

Capítulo 5

Agregados para Concreto

La importancia del uso del tipo y de la calidad correctos del agregado (árido) no se puede subestimar. Los agregados fino y grueso ocupan cerca del 60% al 75% del volumen del concreto (70% a 85% de la masa) e influyen fuertemente en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido, en las proporciones de la mezcla y en la economía del concreto. Los agregados finos (Fig. 5-1) generalmente consisten en arena natural o piedra triturada (partida, macha-



Fig. 5-1. Primer plano de agregado fino (arena). (IMG12185)



Fig. 5-2. Agregado grueso. Grava redondeada (izquierda) y piedra triturada (derecha). (IMG12184)

cada, pedrejón arena de trituración) con la mayoría de sus partículas menores que 5 mm (0.2 pulg.). Los agregados gruesos (Fig. 5-2) consisten en una o en la combinación de gravas o piedras trituradas con partículas predominantemente mayores que 5 mm (0.2 pulg.) y generalmente entre 9.5 mm y 37.5 mm ($\frac{3}{8}$ y $1\frac{1}{2}$ pulg.) Algunos depósitos naturales de agregado, llamados de gravas de mina, consisten en grava y arena que se pueden usar inmediatamente en el concreto, después de un procesamiento mínimo. La grava y la arena naturales normalmente se excavan o dragan de la mina, del río, del lago o del lecho marino. La piedra triturada se produce triturando la roca de cantera, roca redondeada, guijarros o gravas grandes. La escoria de alto horno enfriada al aire y triturada también se usa como agregados fino y grueso.

Los agregados frecuentemente se lavan y se gradúan en la mina o en la planta. Se puede esperar alguna variación en el tipo, calidad, limpieza, granulometría (gradación), contenido de humedad y otras propiedades. Cerca de la mitad de los agregados gruesos en el concreto de cemento portland en Norteamérica es grava, la mayoría del resto es piedra triturada.

Los agregados naturales para concreto son una mezcla de rocas y minerales (véase Tabla 5-1). Mineral es una sustancia sólida natural con una estructura interna ordenada y una composición química que varía dentro de límites estrechos. Las rocas, que se clasifican según su origen en ígneas, sedimentarias o metamórficas, generalmente se componen de varios minerales. Por ejemplo, el granito contiene cuarzo, feldespato, mica y otros pocos minerales, la mayoría de las calizas consiste en calcita, dolomita y pequeñas cantidades de cuarzo, feldespato y arcilla. El intemperismo y la erosión de las rocas producen partículas de piedra, grava, arena, limo y arcilla.

El concreto reciclado o el concreto de desperdicio triturado es una fuente viable de agregados y una realidad económica, especialmente donde los buenos agregados son escasos. Se pueden utilizar equipos convencionales de trituración de piedras y se han desarrollado nuevos equipos para reducir el ruido y el polvo.

Tabla 5-1. Rocas y Constituyentes Minerales en los Agregados

Minerales	Rocas ígneas	Rocas metamórficas
Sílice	Granito	Mármol
Cuarzo	Sienita	Metacuarcita
Ópalo	Diorita	Pizarra
Calcedonia	Gabro	Filita
Tridimita	Periodita	Esquisto
Cristobalita	Pegmatita	Anfibolita
Silicatos	Vidrio volcánico	Hornfels (roca córnea)
Feldespato	Obsidiana	Gneis
Ferromagnesiano	Piedra pómez (pumita)	Serpentinita
Hornblenda	Tufa (toba volcánica)	
Augita	Cagafierro	
Arcilla	Perlita	
Ilitas	Vidrio volcánico	
Caolines	Felsita	
Cloritas	Basalto	
Montmorinollita		
Mica	Rocas Sedimentarias	
Ceolita	Conglomerado	
Carbonato	Arenisca	
Calcita	Cuarcita	
Dolomita	Grauvaca	
Sulfato	Subgrauvaca (molasa)	
Yeso	Arcosa	
Anhidrita	Piedra arcillosa, limonita, argilita y esquisto	
Sulfuro de hierro	Carbonatos	
Pirita	Caliza	
Marcasita	Dolomita	
Pirolita	Marga	
Óxido de hierro	Greda (creta)	
Magnetita	Chert	
Hematita		
Goetita		
Ilmenita		
Limonita		

Para una breve descripción, véanse las descripciones de las rocas en la ASTM C 294, IRAM 1517, NMX-C-305 y UNIT-NM 66.



Fig. 5-3. Agregado ligero. Arcilla expandida (izquierda) y esquisto expandido (derecha). (IMG12186)

Los agregados deben cumplir con algunas normas para que su uso en ingeniería se optimice: deben ser partículas limpias, duras, resistentes, durables y libres de productos químicos absorbidos, revestimiento de arcilla u otros materiales finos en cantidades que puedan afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento. Las partículas de agregados friables (disgregables, deleznales o desmenuzables) o capaces de rajarse son indeseables. Se deben evitar agregados que contienen cantidades apreciables de esquisto u otras rocas esquistosas, de materiales blandos y porosos. Se deben evitar, en especial, algunos tipos de cherts, pues tienen poca resistencia al intemperismo y causan defectos superficiales tales como las erupciones.

Solamente la identificación de los constituyentes de un agregado no puede dar una base para el pronóstico del comportamiento del agregado en servicio. La inspección visual normalmente revela debilidades en los agregados gruesos. Los registros de servicio son inestimables en la evaluación de los agregados. En la ausencia de registros de desempeño, se deben ensayar los agregados antes que se los use en el concreto. Los agregados más frecuentemente utilizados – arena, grava y escoria de alto horno enfriada al aire – producen concretos frescos de peso normal con masa volumétrica (masa unitaria) de 2200 a 2400 kg/m³ (140 a 150 lb/pies³). Agregados de esquisto, arcilla, pizarra y escoria expandidos (Fig. 5-3) se usan para producir estructuras de concreto ligero (liviano) con la masa volumétrica el concreto fresco variando de cerca de 1350 a 1850 kg/m³ (90 a 120 lb/pies³). Otros materiales ligeros tales como la piedra pomez (pumita), cagafierro, perlita, vermiculita y diatomita se emplean para producir concreto ligero aislante con masas volumétricas que varían de 250 a 1450 kg/m³ (15 a 90 lb/pies³). Materiales pesados, tales como barita, limonita, magnetita, ilmenita, hematina y esferas de hierro se usan para producir concreto de densidad elevada (concreto de gran peso) y blindaje para la radiación (ASTM C 637 y C 638). Solamente los agregados de peso normal van a ser presentados en este capítulo. Consulte el Capítulo 18 para los tipos especiales de agregados y concretos.

Los agregados de peso normal deben atender a los requisitos de la ASTM C 33 o AASHTO M 6/M80, COVENIN 277, IRAM 1512, IRAM 1531, IRAM 1627, NCh163, NMX-C-111, NTC 174, NTP 400.037, UNIT 84 y UNIT 102. Estas especificaciones limitan las cantidades permisibles de sustancias deletéreas y proveen requisitos para las características de los agregados. Se determina el cumplimiento con estos requisitos a través de varias pruebas normalizadas que se van a citar en las próximas secciones y tablas. Sin embargo, el uso de agregado que cumple con las normas ASTM C 33 o AASHTO M 6/M80, COVENIN 277, IRAM 1512, IRAM 1531, IRAM 1627, NCh163, NMX-C-111, NTC 174, NTP 400.037, UNIT 84, UNIT 102 no garantiza que el concreto necesariamente estará libre de defectos.

La cantidad deseable de aire, agua, cemento y agregado fino (o sea el mortero) debe ser cerca del 50% al 65% del volumen absoluto (45% a 60% de la masa) del concreto

para que se tenga una consolidación adecuada. Los agregados redondeados, como las gravas, requieren cantidades un poco menores, mientras que agregados triturados requieren cantidades un poco más elevadas. El contenido de agregado fino es normalmente del 35% al 45% de la masa o volumen del contenido total de agregado.

CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS

Las características más importantes de los agregados para concreto se presentan en la Tabla 5-2 y la mayoría se discute en la próxima sección:

Tabla 5-2. Características y Ensayos de los Agregados

Característica	Importancia	Requisito o característica reportada
Resistencia a abrasión y degradación	Índice de calidad del agregado: resistencia al desgaste de pisos y pavimentos	Porcentaje máximo de pérdida de masa. Profundidad de desgaste y tiempo
* ASTM C 131 (AASHTO T 96), COVENIN 0266-77, IRAM 1532, NCh1369.Of1978, NMX-C-196, NTP 400.019, UNIT-NM 51 ASTM C 535, COVENIN 0267-78, NCh1369.Of1978, NMX-C-196, NTP 400.020, UNIT-NM 51 ASTM C 779, NTE 0860		
Resistencia a congelación-deshielo	Descascaramiento superficial, aspereza, pérdida de sección y estética	Número máximo de ciclos o período de inmunidad a congelación, factor de durabilidad.
* ASTM C 666 (AASHTO T 161), COVENIN 1601, NCh2185, NMX-C-205 ASTM C 682 AASHTO T 103		
Resistencia a desintegración por sulfatos	Sanidad contra el intemperismo	Pérdida de masa, partículas que muestren fallas
* ASTM C 88 (AASHTO T 104), COVENIN 0271, IRAM 1525, NCh1328, NMX-C-075-1997- ONNCCE, NTC 126, NTP 400.016, NTE0863		
Forma y textura superficial de las partículas	Trabajabilidad del concreto fresco	Porcentaje máximo de partículas planas y elongadas
* ASTM C 295, IRAM 1649, NMX-C-265, NTC 3773, UNIT-NM 54 ASTM D 3398, COVENIN 0264. IRAM 1681, IRAM 1687, UNIT 1029		
Granulometría	Trabajabilidad del concreto fresco y economía	Porcentajes mínimo y máximo que pasan por los tamices estándar
* ASTM C 117 (AASHTO T 11), IRAM 1540, NMX-C-084, NCh1223, NTC 78, NTE 0697, NTP 400.018, UNIT-NM 46 ASTM C 136 (AASHTO T 27), COVENIN 0255, IRAM 1505, IRAM 1627, NCh165, NMX-C-077, NTC 77, NTE 0696, NTP 400.012, UNIT 48, NTE 0872		
Degradación del agregado fino	Índice de la calidad del agregado: resistencia a degradación durante el mezclado	Cambio de la granulometría
* ASTM C 1137		
Contenido de vacíos no compactado del agregado fino	Trabajabilidad del concreto fresco	Contenido de vacíos no compactado del agregado fino y gravedad específica
* ASTM C 1252 (AASHTO T 304)		
masa volumétrica (masa unitaria)	Cálculos del diseño de la mezcla, clasificación	Peso compactado y peso suelto
* ASTM C 29 (AASHTO T 19), COVENIN 0274, COVENIN 0263, IRAM 1548, NMX-C-073, NTC 92, NTP 400.017, UNIT-NM 45, NTE 8581		
Masa específica relativa	Cálculos del diseño de la mezcla	—
* ASTM C 127 (AASHTO T 85), COVENIN 0269, IRAM 1533, NMX-C-164, NCh1117, NTC 176, NTP 400.021, UNIT-NM 30, UNIT-NM 53 ASTM C 128 (AASHTO T84), COVENIN 0268, IRAM 1520, NCh1239, NMX-C-165, NTC 237, NTP 400.022, UNIT-NM 64, UNIT-NM 52, NTE 0857, NTE 0856		
Absorción y humedad superficial	Control de la calidad del concreto (relación agua-cemento)	—
* ASTM C 70, COVENIN 0272 ASTM C 127 (AASHTO T 85), COVENIN 0269, IRAM 1533, NMX-C-164, NCh1117, NTC 176, NTP 400.021, UNIT-NM 30, UNIT-NM 53 ASTM C 128 (AASHTO T84), COVENIN 0268, IRAM 1520, NCh1239, NMX-C-165, NTC 237, NTP 400.022, UNIT-NM 64, UNIT-NM 52 ASTM C 566 (AASHTO T 255), COVENIN 1375, NMX-C-166, NTC 1776, NTP 339.185		

Tabla 5-2. Características y Ensayos de los Agregados (Continuación)

Característica	Importancia	Requisito o característica reportada
Resistencia a compresión y a la flexión	Aceptación del agregado fino que no haya pasado en los otros ensayos	La resistencia que exceda 95% de la resistencia lograda con arena purificada
* ASTM C 39 (AASHTO T 22), COVENIN 0338, IRAM 1546, NCh1037, NMX-C-083-1997-ONNCCE, NTC 673, NTE 1573, NTP 339.034, UNIT-NM 101 ASTM C 78 (AASHTO T 97), COVENIN 0342, IRAM 1547, NCh1038, NMX-C-191, NTC 2871, NTP 339.078, UNIT-NM 55		
Definiciones de los constituyentes	Entendimiento y comunicación claros	—
* ASTM C 125, NTC 385, NTE 0694:83, NTP 400.011, UNIT-NM 2 ASTM C 294, IRAM 1517, NMX-C-305, UNIT-NM 66		
Constituyentes del agregado	Determinar la cantidad de material deletéreo y orgánico	Porcentaje máximo permitido de los constituyentes individuales
* ASTM C 40 (AASHTO T 21), COVENIN 0256, NCh166, NMX-C-088-1997-ONNCCE, NTC 127, NTP 400.024, UNIT-NM 49, ASTM C 87 (AASHTO T 71), COVENIN 0275, IRAM 1647, NMX-C-07, NTC 579, NTP 400.013, ASTM C 117 (AASHTO T 11), IRAM 1540, NMX-C-084, NCh1223, NTC 78, NTE 0697, NTP 400.018, UNIT-NM 46 ASTM C 123 (AASHTO T 113), COVENIN 0260, NMX-C-072-1997-ONNCCE, NTC 130, NTE 0699, NTP 400.023, UNIT-NM 31 ASTM C 142 (AASHTO T 112), COVENIN 0257, IRAM 1647, NMX-C-071, NCh1327, NTC 589, NTE 0698, NTP 400.015, UNIT-NM 44 ASTM C 295, IRAM 1649, NMX-C-265, NTC 3773, UNIT-NM 54		
Resistencia a la reactividad con los álcalis y cambio de volumen	Sanidad contra cambios de volumen	Cambio máximo longitudinal, constituyentes, cantidad de sílice y alcalinidad.
* ASTM C 227, COVENIN 0276, IRAM 1637, NMX-C-180, NTC 3828, NTP 334.113, NTP 334.067 ASTM C 289, NTC 175, NTP 334.099 ASTM C 295, IRAM 1649, NMX-C-265, NTC 3773, UNIT-NM 54 ASTM C 342, NMX-C-282 ASTM C 586, COVENIN 1303, ASTM C 1260 (AASHTO T 303), IRAM 1674, NMX-C-298, NTP 334.110, UNIT 1038 ASTM C 1293, IRAM 1700		

*El ACI 221R-96 presenta métodos y propiedades adicionales del concreto que se influyen por las características de los agregados.

Granulometría (Gradación)

La granulometría es la distribución del tamaño de las partículas de un agregado, que se determina a través del análisis de los tamices (cedazos, cribas) (ASTM C 136, AASHTO T 27, COVENIN 0255, IRAM 1505, NCh165, NMX-C-077, NTC 77, NTE 0696, NTP 400.012 y UNIT 48). La variación del tamaño de partículas se muestra en la Figura 5-4. El tamaño de las partículas del agregado se determina por medio de tamices de malla de alambre con aberturas cuadradas. Los siete tamices normalizados para el agregado fino tienen aberturas que varían de 150 μm a 9.5 mm (Tamiz No.100 a $\frac{3}{8}$ pulg.) (ASTM C 33, AASHTO M6/M80, IRAM 1512, IRAM 1531, IRAM 1627, NMX-C-111, NTC 174, NTP 400.037) de 0.160 mm a 10 mm (NCh163) y Venezuela especifica 8 tamices, que varían de 75 μm a 9.51 mm (COVENIN 277). Mientras que el agregado grueso se ensaya con 13 tamices estándar, con aberturas que varían de 1.18 mm a 100 mm (0.046 pulg. a 4 pulg.) (ASTM C 33, AASHTO M6/M80, NMX-C-111, NTC 174, NTP 400.037). En Argentina se usan tamices cuyas aberturas varían de 4.75 mm a 63.0 mm (IRAM 1627), en Chile las aberturas varían de 1.25 mm a 80 mm (NCh 163) y en Venezuela de 595 μm a 75 mm (COVENIN 277). Las tolerancias para las aberturas de la malla de los tamices se encuentran en ASTM E 11 (AASHTO M 92), IRAM 1501, NCh1022, NCh1024 y UNIT-ISO 565).



Fig. 5-4. Varios tamaños de partículas que se encuentran en los agregados para uso en concreto. (IMG12320)

Los números de tamaño (tamaño de granulometría) de los agregados gruesos se aplican a las cantidades de agregado (en masa), en porcentaje que pasa a través de un conjunto de tamices (Fig. 5-5). En la construcción de autopistas, la ASTM D 448 (AASHTO M 43) lista los mismos 13 números de tamaño de la ASTM C 33 (AASHTO M 6/M 80), más seis números adicionales de agregados gruesos. El agregado fino o la arena tiene solamente un rango de tamaño de partículas para la construcción en general y para la construcción de carreteras. Algunos países, tales como Argentina, Chile y México no usan números para tratar de tamaños específicos de agregados,



Fig. 5-5. Realización del ensayo de análisis granulométrico del agregado grueso en el laboratorio. (IMG15129)

pero usan los tamaños nominales o grados (tamaños límites).

La granulometría y los límites granulométricos se expresan generalmente en porcentaje de material que pasa a través de cada tamiz. La Figura 5-6 enseña estos límites para el agregado fino y un tamaño de agregado grueso.

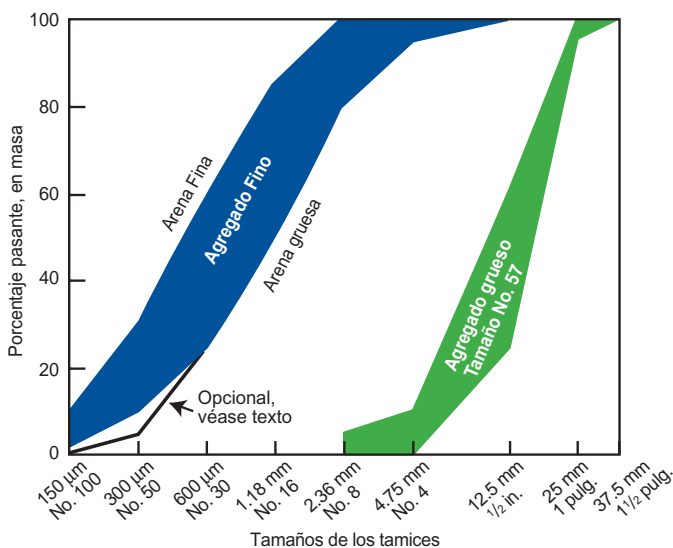


Fig. 5-6. Las curvas indican los límites especificados en la AASHTO M6, IRAM 1512, Nch 163, NMX-C-111, NTC 174 para el agregado fino y para un tamaño granulométrico de agregado grueso comúnmente utilizado.

Hay muchas razones para que se especifiquen los límites granulométricos y el tamaño máximo nominal de los agregados, pues afectan las proporciones relativas de los agregados, bien como la demanda de agua y de cemento, trabajabilidad, bombeabilidad, economía, porosidad, contracción (retracción) y durabilidad del concreto. Las variaciones en la granulometría pueden afectar seriamente la uniformidad del concreto de una mezcla a otra. Las arenas muy finas son normalmente antieconómicas, mientras que arenas y gravas gruesas pueden producir mezclas sin trabajabilidad. En general, los agregados que no tienen una gran deficiencia o exceso de cualquier tamaño y presentan una curva granulométrica suave, producirán los resultados más satisfactorios.

El efecto de la combinación de varios tamaños sobre el volumen total de vacíos entre los agregados se ilustra por un simple método enseñado en la Figura 5-7. La probeta de la izquierda se llena con partículas grandes de agregados con tamaño y forma uniformes. La probeta del medio se

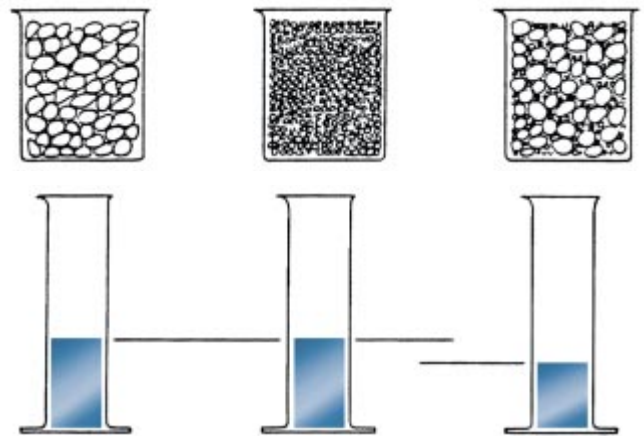


Fig. 5-7. El nivel del líquido en las probetas, que representan a los vacíos, es constante para volúmenes absolutos iguales de agregados con tamaños uniformes, aunque diferentes. Cuando se combinan tamaños diferentes, el contenido de vacíos disminuye. La ilustración no está en escala.

agregado con tamaño y forma uniformes y la probeta de la derecha se llena con partículas de ambos tamaños. Debajo de cada probeta con agregado se enseña una probeta graduada con la cantidad de agua necesaria para llenar los vacíos en la probeta con agregado. Nótese que cuando la probeta se llena con un solo tamaño de partículas, un mismo volumen de agregado contiene una cantidad de vacíos constante, independientemente del tamaño del agregado. Cuando se combinan dos tamaños de agregados, la cantidad de vacíos disminuye. Si se repitiera esta operación con la inclusión adicional de varios tamaños, ocurriría una reducción aún mayor en la cantidad de vacíos. La demanda de pasta de cemento para el concreto se relaciona con la cantidad de vacíos de la combinación de agregados.

Durante los primeros años de la tecnología del concreto, se asumía, algunas veces, que el menor porcentaje de vacíos (mayor densidad del agregado) era más adecuado para el concreto. En la misma época, se crearon límites para las cantidades y tamaños de las partículas más pequeñas. Ahora se sabe que, incluso en estas bases restrictas, este no es el mejor enfoque para el diseñador de la mezcla. Sin embargo, la producción de un concreto satisfactorio y económico requiere agregados con baja cantidad de vacíos, pero no la más baja. Se pueden ensayar los vacíos de los agregados según ASTM C 29 (AASHTO T 19), COEVNIN 0274, COVENIN 0263, IRAM 1548, NMX-C-073, NTC 92, NTP 400.017, UNIT-NM 45.

En realidad, la cantidad de pasta de cemento necesaria en el concreto es mayor que el volumen de vacíos entre los agregados. La Figura 5-8, dibujo A, representa solamente agregados grandes, con todas las partículas en contacto. El dibujo B representa la dispersión de los agregados en la matriz de la pasta. La cantidad de pasta es necesariamente mayor que la cantidad de vacíos en el dibujo A, a fin de que se provea trabajabilidad al concreto. La cantidad real se influencia por la trabajabilidad y la cohesión de la pasta.

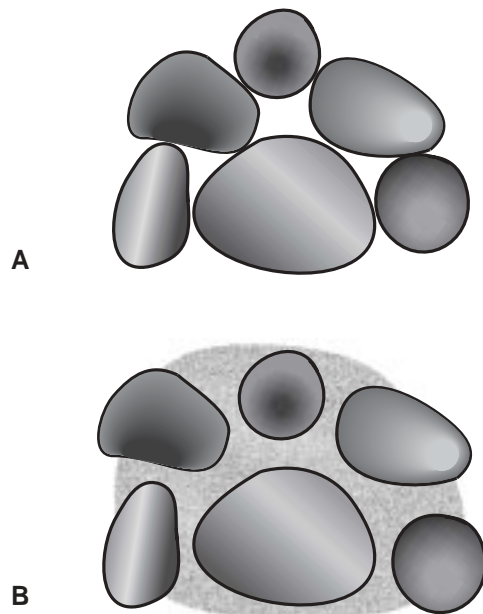


Fig. 5-8. Ilustración de la dispersión de los agregados en mezclas de concreto cohesivas.

Granulometría del Agregado Fino

Los requisitos de las normas ASTM C 33 o AASHTO M6/M80, COVENIN 277, IRAM 1512, NCh163, NMX-C-111, NTC 174, NTP 400.037, UNIT 84 permiten un rango relativamente amplio en la granulometría del agregado fino, pero las especificaciones de otras organizaciones, a veces, son más restrictivas. La granulometría más deseable para el agregado fino depende del tipo de obra, si la mezcla es rica y del tamaño máximo del agregado grueso. En

mezclas más pobres, o cuando se usan agregados gruesos de pequeñas dimensiones, es conveniente, para que se logre una buena trabajabilidad, que la granulometría se aproxime al porcentaje máximo recomendado que pasa por cada tamiz. En general, si se mantiene constante la relación agua-cemento y se elige correctamente la relación agregado fino-agregado grueso, se puede usar un amplio rango de granulometrías, sin efectos considerables sobre la resistencia. Sin embargo, algunas veces, se logrará la mayor economía con el ajuste de la mezcla de concreto para que se adapte a la granulometría de los agregados locales.

La granulometría de los agregados finos de acuerdo con las normas ASTM C 33 (AASHTO M6), COVENIN 277, IRAM 1512, NCh163, NMX-C-111, NTC 174, NTP 400.037, UNIT 84, es generalmente satisfactoria para la mayoría de los concretos. Los límites de estas normas, con respecto a la granulometría se enseñan en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3. Límites granulométricos del Agregado Fino (ASTM C 33/AASHTO M6, COVENIN 277, IRAM 1512, Nch 163, NMX-C-111, NTC 174 y NTP 400.037)

Tamiz†		Porcentaje que pasa (en masa)
9.5 mm	(% pulg.)	100
4.75 mm	(No. 4)	95 a 100
2.36 mm	(No. 8)	80 a 100
1.18 mm	(No. 16)	50 a 85
600 µm	(No. 30)	25 a 60
300 µm	(No. 50)	10 a 30*
150 µm	(No. 100)	2 a 10**

† Las aberturas de los tamices especificados en la Nch 163 son, respectivamente, 10 mm, 5 mm, 2.5 mm, 1.25 mm, 0.630 mm, 0.315 mm y 0.160 mm.

* De acuerdo con la ASTM C 33 y la NTP 400.037 este límite es del 5% a 30%. De acuerdo con la COVENIN 277, el límite de porcentaje que pasa en este tamiz es del 8%.

** De acuerdo con la ASTM C 33 y la NTP 400.037 este límite es del 0% al 10%.

Las especificaciones de la AASHTO, de la NMX y de la NTC permiten que los porcentajes mínimos (por masa) de material que pasa en los tamices de 300 µm (No.50) y 150 µm (No.100) se reduzcan a 5% y 0%, respectivamente, desde que:

1. Se use el agregado en un concreto con aire incluido (incorporado) que contenga más de 237 kg de cemento por m³ de concreto (400 lb de cemento por yarda³ de concreto) y más del 3% de contenido de aire (AASHTO y NTC). En el caso de México, la mezcla debe contener más de 250 kg/m³ de cemento.
2. Se use el agregado en un concreto que contenga más de 297 kg de cemento por m³ de concreto (500 lb de cemento por yarda³ de concreto), cuando el concreto no tenga aire incluido (AASHTO y NTC). En el caso de México, la mezcla debe contener más de 300 kg/m³ de cemento.

3. Se use material cementante suplementario aprobado, a fin de suministrar la deficiencia de material que pasa en los dos tamices.

Otros requisitos de la ASTM C 33 (AASHTO M6), COVENIN 277, IRAM 1501 (parte II), NMX-C-111 y NTC 174 son:

1. El agregado fino no debe contener más del 45% de material retenido entre cualquiera de dos tamices normalizados consecutivos.
2. El módulo de finura debe ser mayor que 2.3 y menor que 3.1, y no debe variar más que 0.2 del valor típico de la fuente del agregado. Si se excede este valor, el agregado se debe rechazar, a menos que se hagan ajustes adecuados en la proporción entre los agregados fino y grueso.

Las cantidades de agregado fino que pasan a través de los tamices de 300 μm (No. 50) y de 150 μm (No. 100) afectan la trabajabilidad, la textura superficial, el contenido de aire y el sangrado (exudación) del concreto. La mayoría de las especificaciones permite un porcentaje que pasa en el tamiz 300 μm (No. 50) del 5% al 30%. El límite más bajo puede ser suficiente para condiciones fáciles de colocación o donde se acabe el concreto mecánicamente, como ocurre en los pavimentos. Sin embargo, en pisos acabados manualmente, o donde se desee una textura superficial lisa, se debe usar un agregado fino con, por lo menos, 15% de masa que pase en el tamiz 300 μm (No. 50) y 3% o más en el tamiz 150 μm (No. 100).

Módulo de Finura. El módulo de finura (MF) tanto del agregado fino como del grueso se calcula, se acuerdo con ASTM C 125, COVENIN 255, IRAM 1627, NCh 165, NMX-C-111, NTC 385, NTE 0694:83, NTP 400.011 y UNIT-NM 2, sumándose los porcentajes acumulados de la masa retenida en cada uno de los tamices de la serie especificada y dividiéndose esta suma por 100. La serie especificada de tamices para la determinación del MF es: 150 μm (No. 100), 300 μm (No. 50), 600 μm (No. 30), 1.18 mm (No. 16), 2.36 mm (No. 8), 4.75 mm (No. 4), 9.5 mm (¾ pulg.), 19.0 mm (¾ pulg.), 37.5 mm (1½ pulg.), 75 mm (3 pulg.) y 150 mm (6 pulg.). La serie especificada de tamices para la determinación del MF en la norma NMX-C-111 no incluye el tamiz de malla 150 mm (6 pulg.).

El MF es un índice de finura del agregado – cuanto mayor el MF, más grueso es el agregado. Agregados con granulometrías diferentes pueden tener el mismo MF. El MF de los agregados finos es útil para estimar las proporciones de agregados fino y grueso en el concreto. Un ejemplo de como se determina el MF del agregado fino (de un análisis granulométrico asumido) se presenta en la Tabla 5-4.

La degradación del agregado fino debido al rozamiento y a la abrasión decrece el MF y aumenta la cantidad de materiales más finos que 75 μm (No. 200).

Tabla 5-4. Determinación del Módulo de Finura de Agregados Finos

Tamiz	Porcentaje de la fracción individual retenida, en masa	Porcentaje acumulado que pasa, en masa	Porcentaje retenido acumulado, en masa
9.5 mm (¾ pulg.)	0	100	0
4.75 mm (No. 4)	2	98	2
2.36 mm (No. 8)	13	85	15
1.18 mm (No. 16)	20	65	35
600 μm (No. 30)	20	45	55
300 μm (No. 50)	24	21	79
150 μm (No. 100)	18	3	97
Fondo	3	0	—
Total	100		283

Módulo de finura
= $283 \div 100 = 2.83$

Granulometría del Agregado Grueso

Los requisitos de granulometría (gradación) del agregado grueso de las normas ASTM C 33 (AASHTO M 80), COVENIN 277, IRAM 1627, NCh163, NMX-C-111, NTC 174, NTP 400.037 y UNIT 102, permiten límites amplios en la granulometría y una gran variedad de tamaños granulométricos (véanse Tablas 5-5 y 5-6). La granulometría del agregado grueso con un determinado tamaño máximo puede variar moderadamente dentro de un rango, sin que afecte apreciablemente las demandas de cemento y agua de la mezcla, si las proporciones del agregado fino, con relación a la cantidad total de agregados, producen un concreto con buena trabajabilidad. Las proporciones de la mezcla se deben cambiar para producir un concreto trabajable si ocurrieran grandes variaciones en la granulometría del agregado grueso. Como estas variaciones son difíciles de predecir, frecuentemente es más económico mantener la uniformidad de la producción y el manejo del agregado grueso, para que se reduzcan las variaciones de la granulometría.

El tamaño máximo del agregado grueso influye en la economía del concreto. Normalmente, se requiere más agua y cemento en concretos con agregados gruesos de tamaño máximo menor si es comparado con agregados de tamaño máximo mayor, debido al aumento del área superficial total del agregado. El agua y cemento necesarios para que se obtenga un revenimiento (asentamiento) de 75 mm (3 pulg.), con el uso de una gran variedad de tamaños de agregados gruesos, se presentan en la Figura 5-9. La Figura 5-9 enseña que, para una cierta relación agua-cemento, la demanda de cemento disminuye a medida que el tamaño máximo del agregado aumenta. El costo elevado para la obtención y manejo de agregados mayores que 50 mm (2 pulg.) puede compensar el ahorro por la utilización de menos cantidad de cemento. Además, agregados de tamaños diferentes pueden producir concretos con resistencias ligeramente diferentes, para una misma

Tabla 5-5. Requisitos Granulométricos para Agregados Gruesos (ASTM C 33, AASHTO M 80, IRAM 1627,

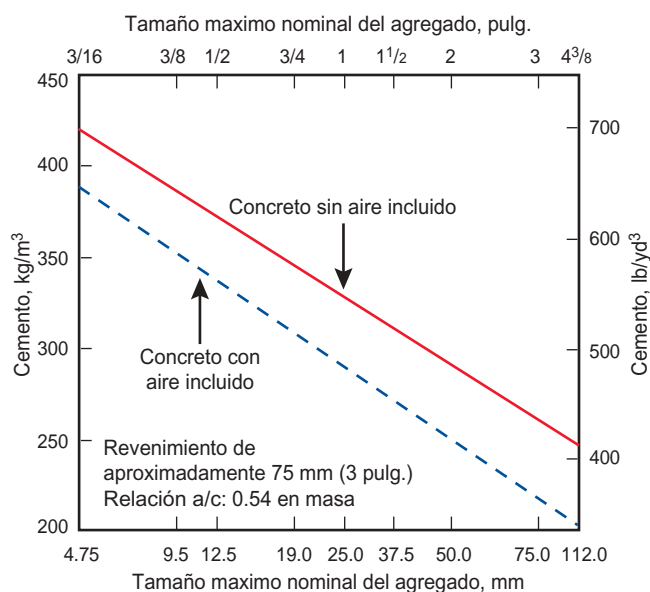
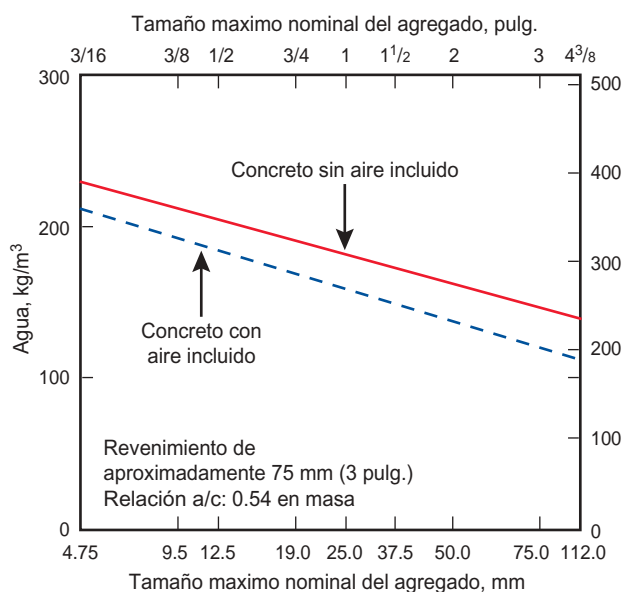
Número del tamaño	Tamaño nominal, tamices con abertura cuadradas*	Cantidades más finas que cada tamiz de laboratorio,					
		100 mm (4 pulg.)	90 mm (3½ pulg.)	75 mm (3 pulg.)	63 mm (2½ pulg.)	50 mm (2 pulg.)	
1	90 a 37.5 mm (3½ a 1½ pulg.)	100	90 a 100	—	25 a 60	—	
2	63 a 37.5 mm (2½ a 1½ pulg.)	—	—	100	90 a 100	35 a 70	
3	50 a 25.0 mm (2 a 1 pulg.)	—	—	—	100	90 a 100	
357	50 a 4.75 mm (2 pulg. a No. 4)	—	—	—	100	95 a 100 ¹	
4	37.5 a 19.0 mm (1½ a ¾ pulg.)	—	—	—	—	100	
467	37.5 a 4.75 mm (1½ pulg. a No. 4)	—	—	—	—	100	
5†	25.0 a 12.5 mm (1 a ½ pulg.)	—	—	—	—	—	
56†	25.0 a 9.5 mm (1 a ¾ pulg.)	—	—	—	—	—	
57	25.0 a 4.75 mm (1 pulg. a No. 4)	—	—	—	—	—	
6†	19.0 a 9.5 mm (¾ a ¾ pulg.)	—	—	—	—	—	
67	19.0 a 4.75 mm (¾ pulg. a No. 4)	—	—	—	—	—	
7	12.5 a 4.75 mm (½ pulg. a No. 4)	—	—	—	—	—	
8	9.5 a 2.36 mm (¾ pulg. a No. 8)	—	—	—	—	—	

† No se especifica en la Nch 163, ni tampoco en la NMX-C-111.

* Los tamaños nominales pueden variar ligeramente de un país al otro. Por ejemplo, en Argentina, los tamaños nominales especificados en mm, mientras que en Chile, la Nch 163, trae los siguientes grados: 63-40 mm, 50-25 mm, 40-20 mm, 40-5 mm, 25-5 mm, 50-5 mm, 12.5-5 mm,

¹ La Nch 163 especifica del 90% a 100%.**Tabla 5-6. Límites de los porcentajes en peso que pasan los tamices de aberturas cuadradas (COVENIN 277)**

Piedra picada o grava	75 mm (3")	64.0 mm (2½")	50.8 mm (2")	38.1 mm (1½")	25.4 mm (1")	19.0 mm (¾")	
Nº 0	—	—	—	—	—	100 a 80	
Nº 1	—	—	—	100	100 a 90	90 a 50	
Nº 2	—	—	100 a 95	90 a 75	70 a 35	30 a 5	
Nº 3	100	100 a 90	95 a 65	60 a 20	10 a 0	5 a 0	

**Fig. 5-9. Contenidos de cemento y agua con relación al tamaño máximo del agregado de concreto con y sin aire incluido. Se requiere menos cemento y agua en mezclas con agregados gruesos grandes (Bureau of Reclamation 1981).**

Nch 163, NMX-C-111, NTC 174, NTP 400.037)**porcentaje que pasa**

	37.5 mm (1½ pulg.)	25.0 mm (1 pulg.)	19.0 mm (¾ pulg.)	12.5 mm (½ pulg.)	9.5 mm (¾ pulg.)	4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 8)	1.18 mm (No. 16)
0 a 15	—	—	0 a 5	—	—	—	—	—
0 a 15	—	—	0 a 5	—	—	—	—	—
35 a 70	0 a 15	—	—	0 a 5	—	—	—	—
—	35 a 70	—	—	10 a 30	—	0 a 5	—	—
90 a 100	20 a 55	0 a 15	—	—	0 a 5	—	—	—
95 a 100 ¹	—	35 a 70	—	—	10 a 30	0 a 5	—	—
100	90 a 100	20 a 55	—	0 a 10	0 a 5	—	—	—
100	90 a 100	40 a 85	—	10 a 40	0 a 15	0 a 5	—	—
100	95 a 100 ¹	—	—	25 a 60	—	0 a 10	0 a 5	—
—	100	90 a 100	—	20 a 55	0 a 15	0 a 5	—	—
—	100	90 a 100	—	—	25 a 55	0 a 10	0 a 5	—
—	—	100	—	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	—
—	—	—	—	100	85 a 100 ¹	10 a 30	0 a 10	0 a 5

los límites de la IRAM 1627 son 53.0 a 4.75 mm, 37.5 a 4.75 mm, 26.5 a 4.75 mm, 19.0 a 4.75 mm, 13.2 a 4.75 mm, 53.0 a 26.5 mm y 37.5 a 19.0 10-2.5 mm. La norma mexicana se diferencia, en este aspecto, de la norma chilena solamente en el tamaño 64 a 40 mm.

	12.7 mm (½")	9.51 mm (¾")	6.35 mm (¼")	4.76 mm (No. 4)	2.38 mm (No. 8)	1.19 mm (No. 16)	595 µm (No. 30)	297 µm (No. 50)
	100 50	85 a 25	60 a 15	40 a 5	20 a 0	10 a 0	5 a	—
	45 a 15	20 a 0	7 a 0	—	—	—	—	—
	10 a 0	5 a 0	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—

relación agua-cemento. Por ejemplo, con una misma relación agua-cemento, el concreto con un agregado de tamaño máximo menor podría tener una resistencia a compresión mayor. Esto se verifica principalmente en los concretos de alta resistencia. El tamaño máximo óptimo del agregado grueso para resistencias más elevadas depende de factores, tales como resistencia relativa de la pasta de cemento, adherencia entre cemento y agregado y resistencia de las partículas de agregado.

La terminología que se usa para especificar el tamaño del agregado se debe elegir cuidadosamente. El tamaño de la partícula se determina por el tamaño de la abertura del tamiz y se aplica al agregado que pasa a través de éste y que se queda retenido en el tamiz inmediatamente menor. Cuando se habla de una clasificación de tamaños de partículas, se usa en algunos países (Colombia, EE.UU., Perú y Venezuela) el número de tamaño (o tamaño granulométrico), mientras que en otros países (Argentina, Chile, México) se refiere a una clasificación a través del tamaño

máximo nominal. El número del tamaño se aplica a una cantidad colectiva de agregado que pasa a través de un conjunto de tamices. Como se puede observar en las Tablas 5-5 y 5-6, la cantidad de agregado que pasa a través del respectivo tamiz se representa en porcentaje y se llama de análisis granulométrico.

Algunas veces, hay una confusión entre el significado del tamaño máximo del agregado. La ASTM C 125, Nch 163, NTC 385, NTE 0694:83, NTP 400.037, UNIT-NM 2 y el ACI 116 definen este término como el menor tamiz por el cual toda la muestra de agregado grueso debe pasar. El tamaño máximo nominal se define por la ASTM C 125 y por el ACI 116 como el menor tamiz por el cual la mayor parte de la muestra de agregado grueso debe pasar. El tamiz del tamaño máximo nominal puede retener del 5% a 15% de la masa, dependiendo del número de tamaño. Por ejemplo, un agregado con número de tamaño 67 tiene un tamaño máximo de 25 mm (1 pulg.) y un tamaño máximo nominal de 19 mm (¾ pulg.), 91% de este agregado debe

pasar por el tamiz de 19 mm ($\frac{3}{4}$ pulg.) y todas las partículas deben pasar el tamiz de 25 mm (1 pulg.). La NTP 400.037 define el tamaño máximo nominal del agregado como el menor tamiz que produce el primer retenido, pero no especifica el límite del porcentaje retenido, mientras que la Nch 163 define el tamaño máximo nominal (D_n) como la abertura del tamiz inmediatamente inferior al tamaño máximo absoluto (equivalente al que se llama de tamaño máximo en las normas de los otros países citados aquí), cuando por este tamiz pase 90% o más de la muestra. Cuando menos del 90% pasa por este tamiz, se considera como D_n el propio tamaño máximo absoluto.

El tamaño máximo de agregado que se puede utilizar depende del tamaño y de la forma del miembro de concreto y de la cantidad y distribución del acero de refuerzo (armadura). Normalmente, el tamaño máximo del agregado no puede exceder:

1. Un quinto de la dimensión más pequeña del miembro de concreto.
2. Tres cuartos del espacio libre entre las barras de acero del refuerzo y entre las varillas de refuerzo y las cimbras (encofrados).
3. Un tercio de la profundidad de las losas.

Se puede renunciar a estos requisitos si, en la opinión del ingeniero, la mezcla poseyera una trabajabilidad suficiente para que el concreto se coloque adecuadamente sin la formación de agujeros y vacíos.

Granulometría Combinada del Agregado

Algunas veces, se analiza el agregado con el uso de la granulometría combinada de los agregados fino y grueso, de la misma manera como se presentarán en el concreto. Esto provee un análisis más minucioso de cómo los agregados actuarán en el concreto. Algunas veces, hay una carencia en el abastecimiento de agregados de tamaños medianos, aproximadamente 9.5 mm ($\frac{3}{8}$ pulg.), resultando en alta contracción, alta demanda de agua, baja trabajabilidad, baja bombeabilidad y dificultad de colocación. La resistencia y la durabilidad también se pueden afectar.

La Figura 5-10 ilustra una granulometría ideal. Sin embargo, la granulometría ideal no existe en el campo – pero podemos acercarnos de ella. Se debe considerar el uso de agregados alternativos, combinación de agregados o tamizados especiales de agregados existentes si se desarrollen problemas debido a la granulometría pobre. Consulte Shilstone (1990) para opciones para obtener la granulometría óptima del agregado.

La granulometría combinada se puede usar para controlar mejor la trabajabilidad, la bombeabilidad, la contracción (retracción), además de otras propiedades del concreto. Abrams (1918) y Shilstone (1990) demostraron los beneficios del análisis del agregado combinado:

- Para un contenido constante de cemento y una consistencia constante, existe una combinación óptima de

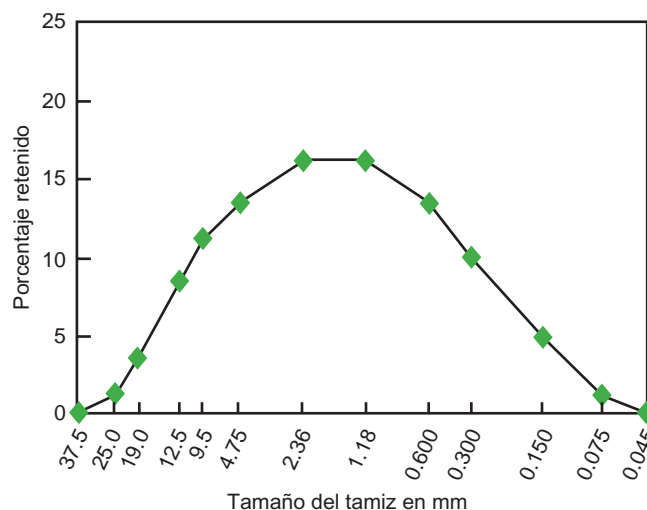


Fig. 5-10. **Granulometría óptima combinada de agregado para concreto.**

agregados que producirá la relación agua-cemento más eficiente y la mayor resistencia.

- La mezcla óptima tiene la menor interferencia de las partículas y responde mejor a los vibradores de alta frecuencia y alta amplitud.

Sin embargo, la mezcla óptima no se puede utilizar en todas las obras debido a la variación de las necesidades de colocación y acabado, bien como de su disponibilidad. Crouch (2000) encontró, en su estudio de concretos con aire incluido, que la relación agua-cemento podría reducirse más del 8% con el uso de la granulometría combinada. Shilstone (1990) también analiza la gradación del agregado, a través de factores de aspereza y trabajabilidad, para mejorar la granulometría del agregado.

Agregado con Granulometría Discontinua

En los agregados con granulometría discontinua, ciertos tamaños de partículas se omiten intencionalmente. Para el concreto mezclado en obra, los agregados discontinuos típicos consisten en un solo tamaño de agregado grueso con todas las partículas de agregado fino capaces de pasar a través de los vacíos en el agregado grueso compactado. Las mezclas discontinuas se usan en el concreto arquitectónico (a la vista) para obtener texturas uniformes en concretos con agregados expuestos. También se los pueden usar en concretos estructurales normales, debido a posibles mejoras en algunas propiedades del concreto y por permitir el uso de las granulometrías de agregados locales (Houston 1962 y Litvin y Pfeifer 1965).

En un agregado con tamaño máximo de 19 mm ($\frac{3}{4}$ pulg.), las partículas de 4.75 mm a 9.5 mm (No. 4 a $\frac{3}{8}$ pulg.) se pueden omitir, sin que el concreto se vuelva excesivamente áspero o propenso a segregarse. En el caso del agre-

gado con 37.5 mm (1½ pulg.), normalmente se omiten los tamaños 4.75 a 19 mm (No.4 a ¾ pulg.).

Se debe tener cuidado al elegirse el porcentaje de agregado fino en la mezcla discontinua. Una elección incorrecta puede resultar en un concreto que esté propenso a segregarse o a formar agujeros, debido al exceso de agregado grueso. Además, un concreto con exceso de agregado fino puede tener una alta demanda de agua, resultando en un concreto con baja densidad. El agregado fino ocupa, normalmente, del 25% al 35% del volumen total de agregados. El porcentaje más bajo se usa con agregados redondeados y el más elevado con los agregados triturados. Para que se obtenga un acabado liso al retirarse el concreto de la cimbra (encofrado), se puede usar un porcentaje de agregado fino con relación al agregado total un poco más elevado que aquél utilizado en el concreto con agregado expuesto, pero ambos utilizan una cantidad menor de agregados finos que los concretos con granulometría continua. La cantidad de agregado fino también depende del contenido de cemento, del tipo de agregado y de la trabajabilidad.

Normalmente se requiere la inclusión de aire para la mejoría de la trabajabilidad, pues los concretos de bajo revenimiento (asentamiento) y con granulometría discontinua usan bajos porcentajes de agregado fino y producen mezclas ásperas si no hay inclusión de aire.

Se debe prevenir la segregación de las mezclas con agregado discontinuo, restringiéndose el revenimiento (asentamiento) al menor valor consistente con una buena consolidación. Esto puede variar de cero a 75 mm (hasta 3 pulg.), dependiendo del espesor de la sección, de la cantidad de refuerzo y la altura de colocación. También se hace necesario un control más restricto de la granulometría y del contenido de agua, pues las variaciones pueden causar segregación. Si se requiere una mezcla áspera, los agregados discontinuos pueden producir resistencias superiores a las de los concretos con agregados normales que tengan contenidos de cemento comparables. Debido a sus bajos volúmenes de agregado fino y relación agua-cemento, las mezclas de granulometría discontinua se pueden considerar no trabajables en algunos tipos de obras. Sin embargo, estos concretos, si son proporcionados adecuadamente, se consolidan fácilmente a través de vibración.

Forma y Textura Superficial de las Partículas

La forma y la textura superficial de las partículas de un agregado influyen en las propiedades del concreto fresco más que las del concreto endurecido. Las partículas con textura áspera, angulares o elongadas requieren más agua para producir un concreto trabajable que agregados lisos, redondeados y compactos. Además, las partículas de agregado angulares requieren más cemento para mantener la misma relación agua-cemento. Sin embargo, con la granulometría satisfactoria, tanto los agregados triturados como los no triturados (de un mismo tipo de roca), generalmente,

producen concretos con la misma resistencia, si se mantiene el contenido de cemento. Los agregados angulares o con granulometría pobre también pueden ser más difíciles de bombear.

La adherencia entre la pasta de cemento y un determinado agregado generalmente aumenta con el cambio de partículas lisas y redondeadas por las ásperas y angulares. Cuando la resistencia a flexión es importante o cuando se necesite alta resistencia a compresión, se debe considerar este aumento de la adherencia al elegirse el agregado para el concreto.

La cantidad de vacíos de los agregados fino y grueso compactados se puede usar como un índice de las diferencias en la forma y la textura de los agregados con la misma granulometría. La demanda de agua de mezcla y cemento normalmente aumentan con el aumento de la cantidad de vacíos. Los vacíos entre las partículas de agregados aumentan con la angularidad del agregado.

El agregado debe ser relativamente libre de partículas planas y elongadas. Una partícula se considera plana y elongada cuando la relación entre longitud y espesor supera un valor especificado. Consulte la ASTM D 4791 para la determinación de las partículas planas y/o alargadas. La ASTM D 3398, COVENIN 0264, IRAM 1681, IRAM 1687, UNIT 1029 suministran un método indirecto para establecer un índice como una medida general de la textura y forma de las partículas, mientras que la ASTM C 295, IRAM 1649, NMX-C-265, NTC 3773 y UNIT-NM 54 presentan procedimientos para el examen petrográfico del agregado.

Las partículas planas y elongadas se deben evitar o, por lo menos, limitar a cerca del 15% de la masa total del agregado. Este requisito es igualmente importante para el agregado grueso y para el agregado fino triturado, pues el agregado fino obtenido por la trituración de la roca frecuentemente contiene partículas planas y elongadas. Estas partículas de agregado requieren un aumento del agua de mezcla y, por lo tanto, pueden afectar la resistencia del concreto, principalmente a flexión, si no se ajusta la relación agua-cemento.

Están disponibles varias máquinas de ensayo para la determinación rápida de la distribución del tamaño de las partículas del agregado. Diseñadas para dar una alternativa más rápida al ensayo normalizado de análisis granulométrico, estas máquinas captan y analizan imágenes digitales de las partículas de agregado para determinar la granulometría. La Figura 5-11 enseña un "videograder" que mide el tamaño y la forma de un agregado, usando cámaras para el escáner de línea, donde se construyen imágenes en dos dimensiones para una serie de imágenes en línea. Otras máquinas usan cámaras con escáner de matriz que captan fotos bi-dimensionales del agregado que cae. Maerz y Lusher (2001) desarrollaron un prototipo de un sistema de imágenes dinámicas que provee informaciones sobre el tamaño y la forma de las partículas con el uso de sistema de mini esteras transportadoras para hacer



Fig. 5-11. Videograder para medir el tamaño y la forma de los agregados. (IMG12424)

que los fragmentos individuales pasen delante de dos cámaras sincronizadas y orientadas ortogonalmente.

Masa Volumétrica (Masa Unitaria) y Vacíos

La masa volumétrica (masa unitaria) de un agregado es la masa o el peso del agregado necesario para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado. El volumen a que se refiere aquí es aquél ocupado por los agregados y por los vacíos entre las partículas de agregado.

La masa volumétrica aproximada del agregado comúnmente usado en el concreto de peso normal varía de 1200 a 1750 kg/m³ (75 a 110 lb/pie³). La cantidad de vacíos entre las partículas afecta la demanda de pasta en el diseño de la mezcla (véase la sección anterior, “Forma y Textura Superficial de las Partículas”). La cantidad de vacíos varía de cerca del 30% a 45% para el agregado grueso y de cerca del 40% a 50% para el agregado fino. La angularidad aumenta la cantidad de vacíos, mientras que los tamaños mayores de un agregado bien graduado y la mejoría de la granulometría disminuyen el contenido de vacíos (Fig. 5-7). Los métodos para la determinación de la masa volumétrica del agregado y el contenido de vacíos se encuentran en las normas ASTM C 29 (AASHTO T 19), COVENIN 0274, COVENIN 0263, IRAM 1548, NMX-C-073, NTC 92, NTP 400.017, UNIT-NM 45. En estas normas, se describen tres métodos para la consolidación del agregado en el recipiente, dependiendo del tamaño máximo del agregado: varillado, sacudido y vaciado con pala. La

medición del contenido de vacíos suelto del agregado fino se presenta en la ASTM C 1252.

Masa Específica Relativa (Densidad Relativa, Gravedad Específica)

La masa específica relativa (densidad relativa, gravedad específica) de un agregado es la relación entre su masa y la masa de agua con el mismo volumen absoluto. Se la usa en algunos cálculos de proporcionamiento y del control de la mezcla, tales como el volumen ocupado por el agregado en el método del volumen absoluto de diseño de mezcla. Normalmente no se la usa como una medida de la calidad del agregado, aunque algunos agregados porosos que exhiben deterioro acelerado por congelación-deshielo presentan baja gravedad específica. La mayoría de los agregados naturales tiene masas específicas relativas que varían de 2.4 a 2.9, con masa específica correspondiente de las partículas de 2400 a 2900 kg/m³ (150 y 181 lb/pie³).

Los métodos de ensayo (prueba) para la determinación de la masa específica relativa de los agregados fino y grueso se describen en las normas ASTM C 127 (AASHTO T 85), COVENIN 0269, IRAM 1533, NCh1117, NMX-C-164, NTC 176, NTE 0856, NTP 400.021, UNIT-NM 30, UNIT-NM 53 y ASTM C 128 (AASHTO T 84), COVENIN 0268, IRAM 1520, NCh1239, NTE 857, NMX-C-165, NTC 237, NTP 400.022, UNIT-NM 64, UNIT-NM 52, respectivamente. La masa específica relativa de un agregado se puede determinar en la condición seca al horno o saturada con superficie seca. Ambas masas específicas se pueden utilizar en los cálculos del proporcionamiento del concreto. Los agregados secados al horno no contienen ninguna agua absorbida ni tampoco agua libre. Se las seca en un horno hasta la constancia de masa. Los agregados saturados con superficie seca son aquéllos cuyos poros de cada partícula de agregado están llenos de agua, pero no hay exceso de agua en la superficie de las partículas.

Masa Específica (Densidad)

La masa específica (densidad) de las partículas que se usa en los cálculos de proporcionamiento (no incluyen los vacíos entre las partículas) se determina por la multiplicación de la masa específica relativa de los agregados por la densidad del agua. Se usa un valor para la densidad del agua de aproximadamente 1000 kg/m³ (62.4 lb/pie³). La masa específica del agregado, juntamente con valores más precisos de la densidad del agua, se presentan en las normas ASTM C 127 (AASHTO T 85) y ASTM C 128 (AASHTO T 84). La masa específica de las partículas de la mayoría de los agregados naturales está entre 2400 y 2900 kg/m³ (150 y 181 lb/pie³).

Absorción y Humedad Superficial

La absorción y la humedad superficial de los agregados se deben determinar de acuerdo con las normas ASTM C 70, COVENIN 0272, ASTM C 127, COVENIN 0269, IRAM 1533, NMX-C-164, NCh1117, NTC 176, NTP 400.021, UNIT-NM 30, UNIT-NM 53; ASTM C 128, COVENIN 0268, IRAM 1520, NCh1239, NMX-C-165, NTC 237, NTP 400.022, UNIT-NM 64, UNIT-NM 52; ASTM C 566 (AASHTO T 255), COVENIN 1375, NMX-C-166, NTC 1776, NTP 339.185 así el agua total del concreto se puede controlar y las masas correctas de los materiales de la mezcla se pueden determinar. La estructura interna de una partícula de agregado se constituye de materia sólida y vacíos que pueden o no contener agua.

Las condiciones de humedad de los agregados se presentan en la Figura 5-12 y se las puede definir como:

1. **Secado al horno** – totalmente absorbente
2. **Secado al aire** – la superficie de las partículas está seca, pero su interior contiene humedad y, por lo tanto, aún es ligeramente absorbente
3. **Saturado con superficie seca (SSS)** – no absorben ni ceden agua al concreto
4. **Húmedos** – Contiene un exceso de humedad sobre la superficie (agua libre)

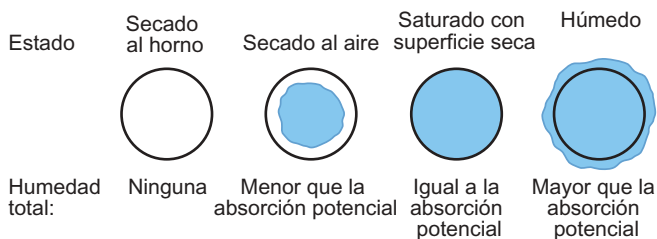


Fig. 5-12. Condiciones de humedad de los agregados.

La cantidad de agua que se adiciona en la planta de concreto se debe ajustar para las condiciones de humedad de los agregados, a fin de que se atienda a la demanda de agua del diseño de la mezcla de manera precisa. Si el contenido de agua del concreto no se mantiene constante, la relación agua-cemento variará de una amasada a la otra, resultando en la variación de otras propiedades, tales como la resistencia a compresión y la trabajabilidad.

Los agregados grueso y fino generalmente tienen niveles de absorción (contenido de humedad a SSS) que varían del 0.2% al 4% y del 0.2% al 2%, respectivamente. Los contenidos de agua libre generalmente varían del 0.5% al

2% para el agregado grueso y del 2% al 6% para el agregado fino. El contenido máximo de humedad del agregado grueso drenado es normalmente menor que aquél del agregado fino. La mayoría de los agregados finos puede mantener un contenido máximo de humedad drenada de cerca del 3% al 8%, mientras que el agregado grueso puede mantener del 1% al 6%.

Abundamiento (Hinchamiento, Abultamiento). El abundamiento (hinchamiento, abultamiento) es el aumento del volumen total del agregado fino húmedo con relación a la misma masa seca. La tensión superficial en el agua mantiene las partículas separadas, resultando en un aumento de volumen. El abundamiento del agregado fino (como la arena) ocurre cuando se lo manipula o se lo mueve en la condición húmeda, aunque se lo haya consolidado totalmente de antemano. La Figura 5-13 presenta como el abundamiento del agregado fino varía con el contenido de humedad y la granulometría: el agregado más fino hincha más que agregados con granulometrías más gruesas para una dada cantidad de humedad. La Figura 5-14 enseña una información similar en términos de masa para un agregado en particular. Como la mayoría de los agregados se entregan en la condición húmeda, pueden ocurrir grandes variaciones en las cantidades de la mezcla, si se hace la dosificación en volumen. Por esta razón, una buena práctica es la dosificación en masa y el ajuste de la humedad.

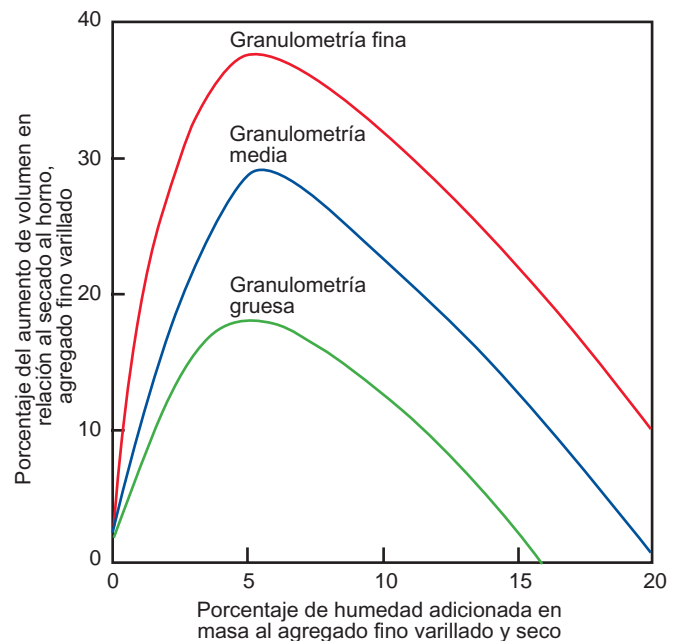


Fig. 5-13. La humedad superficial en el agregado fino puede causar un abundamiento considerable, cuya magnitud varía con la cantidad de humedad y con la granulometría del agregado (PCA Major Series 172 y PCA ST20).

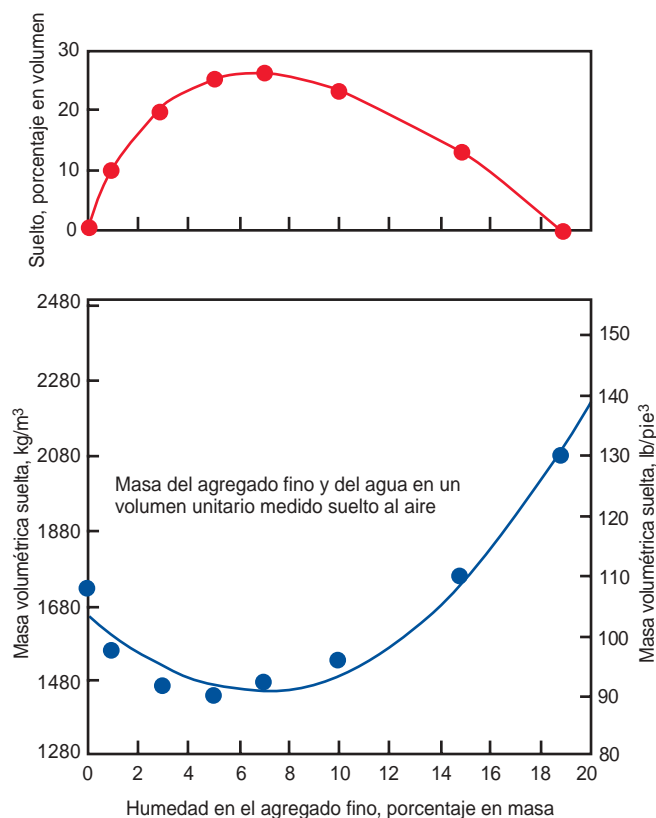


Fig. 5-14. Comparación de la masa volumétrica con el contenido de humedad para una arena en particular (PCA Major Series 172)

Resistencia a Congelación y Deshielo

La resistencia a la congelación de un agregado, que es una característica importante para el concreto que se aplique exteriormente, se relaciona con su porosidad, absorción, permeabilidad y estructura de los poros. Una partícula de agregado puede absorber tanta agua (hasta la saturación crítica) que no puede soportar la expansión y la presión hidráulica que ocurren durante el congelamiento del agua. Si hay una cantidad suficiente de partículas afectadas, puede haber una expansión del agregado y una posible desintegración del concreto. Si una única partícula problemática está cerca de la superficie del concreto, puede ocurrir una erupción. Las erupciones generalmente aparecen con fragmentos cónicos que se desprenden de la superficie del concreto. En este caso, la partícula de agregado afectada se encuentra en el fondo del hueco. Normalmente son las partículas del agregado grueso, más que del fino, que presentan valores más elevados de porosidad y poros con tamaños medianos (0.1 a 5 μm), las que más fácilmente se saturan y causan el deterioro del concreto y el apareamiento de erupciones. Los poros más grandes normalmente no se saturan o causan fallas en el concreto y el agua en los poros más finos tal vez no se congele fácilmente.

En cualquier velocidad de congelamiento, puede haber un tamaño de partícula crítico que al superar la

partícula fallará cuando estuviera críticamente saturada. El tamaño crítico depende de la velocidad de congelación y de la porosidad, permeabilidad y resistencia a la tensión (tracción) de la partícula. En los agregados de granos finos con baja permeabilidad (por ejemplo, chert), el tamaño crítico de las partículas puede estar dentro del rango de tamaños normales del agregado. El tamaño crítico es mayor para los agregados con granos más gruesos o para aquellos con un sistema de capilaridad interrumpido por muchos macroporos (vacíos tan grandes que no mantienen la humedad por acción capilar). Para estos agregados, el tamaño crítico de partícula puede ser suficientemente grande para que no tenga ninguna consecuencia, aunque la absorción sea elevada. Si se utilizan agregados potencialmente vulnerables en el concreto que se mantenga permanentemente seco, estos agregados nunca pueden volverse suficientemente saturados para que causen daños al concreto.

El agrietamiento (fisuración) de los pavimentos, causado por el deterioro por congelación-deshielo del agregado en el concreto, se llama agrietamiento en D. Este tipo de fisuras se ha observado en algunos pavimentos después de tres o más años de servicio. El concreto con fisuras en D se parece al concreto dañado por el congelamiento que causa el deterioro de la pasta. Las grietas en D son fisuras poco espaciadas y paralelas a las juntas transversal y longitudinal que posteriormente se multiplican desde las juntas hacia el centro del panel del pavimento (Fig. 5-15). El agrietamiento en D es función de las propiedades de los poros de ciertos tipos de agregados y del ambiente de exposición del pavimento. Debido a la acumulación natural de agua bajo los pavimentos en las capas de subbase y base, los agregados eventualmente se pueden volver saturados.

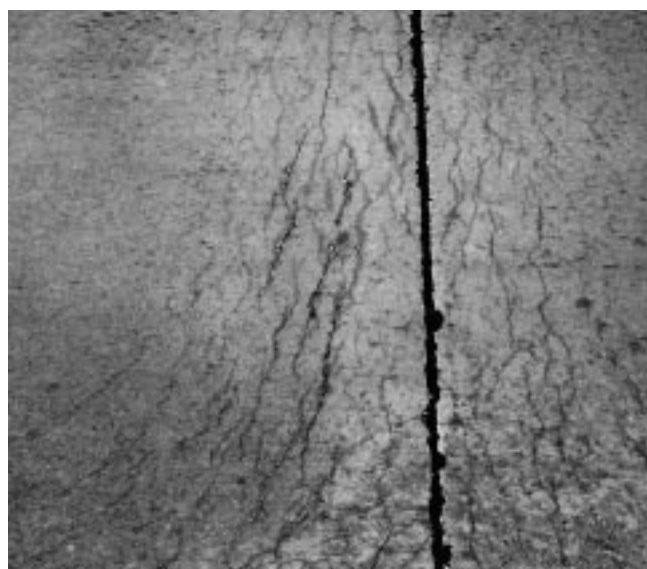


Fig. 5-15. Agrietamiento tipo D a lo largo de la junta transversal, causado por la falla del agregado grueso de carbonato (Stark 1976). (IMG12314)

Entonces, con los ciclos de congelación y deshielo, el agrietamiento del concreto empieza en los agregados saturados (Fig. 5-16), en el fondo de la losa y se propaga hacia arriba hasta que alcance la superficie. Este problema se puede reducir o con la elección de los agregados con mejor desempeño en los ciclos de congelación-deshielo o, cuando se deben utilizar agregados susceptibles a daños por congelamiento, con la reducción del tamaño máximo de las partículas. Además, la instalación de bases permeables o de un sistema de drenaje eficiente que retire el agua de abajo del pavimento, puede ser útil (Harrigan 2002).

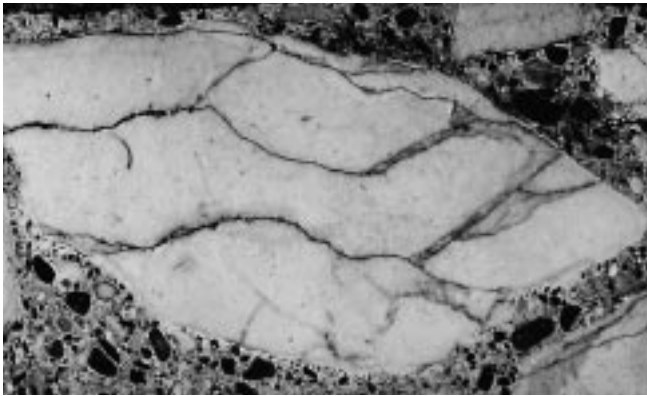


Fig. 5-16. Partícula fracturada de agregado de carbonato como una fuente de falla en el agrietamiento tipo D (aumento de 2.5X) (Stark 1976). (IMG12315)

El comportamiento de los agregados expuestos a congelamiento y deshielo se puede evaluar de dos maneras: (1) desempeño anterior en campo y (2) ensayos de laboratorio en probetas de concreto. Si los agregados de una misma fuente presentaron un comportamiento en servicio satisfactorio cuando son usados en el concreto, se los podría considerar adecuados. Los agregados que no tengan un registro de servicio se pueden considerar aceptables si tuvieran un comportamiento satisfactorio en el ensayo de congelación-deshielo ASTM C 666 (AASHTO T 161), COVENIN 1601, NCh2185, NMX-C-205. En este ensayo, probetas de concreto producidas con el agregado en cuestión se someten a ciclos alternados de congelación y deshielo en agua. El deterioro se mide por: (1) la reducción en el módulo de elasticidad dinámico, (2) expansión lineal y (3) pérdida de masa del espécimen. Muchos departamentos de autopistas de los Estados Unidos usan el criterio de la falla cuando se atinge una expansión de 0.035% en 350 ciclos o menos para ayudar a indicar si un agregado es susceptible al agrietamiento en D. Los diferentes tipos de agregados pueden cambiar los niveles del criterio y las correlaciones empíricas de los ensayos de laboratorio de congelación-deshielo. Se deben hacer registros de servicio de campo para elegirse el criterio adecuado (Vogler y Grove 1989).

Las especificaciones pueden requerir que la resistencia a la intemperie se demuestre a través de ensayos con sulfato de sodio y sulfato de magnesio (ASTM C 88 o AASHTO T 104, COVENIN 0271, IRAM 1525, NCh1328, NMX-C-075-1997- ONNCCE, NTC 126, NTP 400.016). El ensayo consiste en un número de ciclos de inmersiones del agregado en una solución de sulfato, pues la presión interna que se establece con el crecimiento de los cristales de sal en los poros de los agregados se asemeja con aquella producida por el congelamiento del agua. Entonces, se seca la muestra en el horno y se calcula el porcentaje de pérdida de masa. lamentablemente, este ensayo, algunas veces, es engañoso. Los agregados que se comportan de manera satisfactoria en este ensayo pueden producir concretos con baja resistencia a congelación-deshielo y, por el contrario, agregados con un desempeño pobre pueden producir concretos con la resistencia adecuada. Esto se atribuye, al menos en parte, a que los agregados en el ensayo no están confinados por la pasta de cemento (como estarían en el concreto) y los mecanismos de ataque no son los mismos de la congelación-deshielo. El ensayo es más confiable para rocas estratificadas con capas porosas o planos de estratificación.

Un ensayo (prueba) adicional, que se puede utilizar en la evaluación del agregado cuanto al apareamiento potencial de fisuras en D, es el método de liberación rápida de presión. El agregado se coloca en una cámara presurizada y, entonces, se libera la presión rápidamente causando la fractura del sistema de poros dudoso (Jansen y Zinder 1994). El grado de fisuración indica el potencial de agrietamiento en D.

Propiedades de Humedecimiento y Secado

El intemperismo debido al humedecimiento y secado puede afectar la durabilidad del agregado. Los coeficientes de expansión y contracción de las rocas varían con la temperatura y el contenido de humedad. En algunos agregados, pueden ocurrir deformaciones elevadas si ocurren humedecimientos y secados alternos y, en el caso de algunos tipos de rocas, esto puede causar un aumento permanente de volumen y su eventual ruptura. Los terrones de arcilla y otras partículas friables (deleznables, disgregables o dezmenuzables) se pueden degradar rápidamente con el humedecimiento y secado repetidos. También se pueden desarrollar erupciones, resultantes de las características de hinchazón por la humedad, de algunos agregados, principalmente en arcillas y esquistos. A pesar de que no existen ensayos específicos para determinar esta tendencia, un petrógrafo experimentado puede frecuentemente ayudar a determinar el potencial de falla.

Abrasión y Resistencia al Derrapamiento

La resistencia a la abrasión (desgaste) de un agregado frecuentemente se usa como un índice general de su calidad. La resistencia a la abrasión es esencial cuando el agre-

gado se usará en un concreto sujeto al desgaste, como en los pisos para servicio pesado (industriales) o pavimentos. La baja resistencia al desgaste de un agregado puede aumentar la cantidad de finos en el concreto durante el mezclado y, consecuentemente, puede haber un aumento en la demanda de agua, requiriéndose ajustes de la relación agua-cemento.

El ensayo más común de resistencia a la abrasión es el ensayo de abrasión Los Angeles (método del tambor giratorio) realizado de acuerdo con la ASTM C 131 (AASHTO T 96), COVENIN 0266-77, IRAM 1532, NCh1369.Of1978, NMX-C-196, NTP 400.019, UNIT-NM 51 o ASTM C 535, COVENIN 0267-78, NCh1369, NMX-C-196, NTP 400.020, UNIT-NM 51. En este ensayo, una cantidad especificada de agregado se coloca en un tambor de acero que contiene esferas de acero, se gira el tambor y se mide el porcentaje de material desgastado. Las especificaciones normalmente establecen un límite máximo de pérdida de masa. Sin embargo, una comparación de los resultados de los ensayos de abrasión con la resistencia a abrasión de un concreto producido con el mismo agregado, generalmente no muestra una clara relación. La pérdida de masa resultante del impacto en el tambor, frecuentemente, es comparable con aquélla por abrasión. La resistencia al desgaste del concreto se determina más precisamente por la abrasión del propio concreto (véase el Capítulo 1).

Para lograr una buena resistencia al derrapamiento (resbalón) en los pavimentos, el contenido de partículas silíceas del agregado fino debe ser, por lo menos, 25%. Para propósitos de especificación, el contenido de partículas silíceas se considera igual al residuo insoluble, después del tratamiento en ácido clorhídrico bajo condiciones normalizadas (ASTM D 3042). Algunas arenas manufacturadas producen superficies resbalosas de pavimentos y se las debe investigar para aceptación antes de su uso.

Resistencia y Contracción

La resistencia del agregado raramente se ensaya y, generalmente, no influye en la resistencia del concreto convencional tanto cuanto la resistencia de la pasta y de la adherencia pasta-agregado. Sin embargo, la resistencia del agregado se vuelve importante en el concreto de alta resistencia. Los niveles de esfuerzos (tensiones) en el agregado son, frecuentemente, mucho mayores que el esfuerzo promedio en toda la sección del concreto. Las resistencias a tensión (tracción) de los agregados varían de 20 a 150 kg/cm² o de 2 a 15 MPa (300 a 2300 lb/pulg²) y la resistencia a compresión varía de 660 a 2750 kg/cm² o de 65 a 270 MPa (10,000 a 40,000 lb/pulg²). La resistencia se puede medir de acuerdo con la ASTM C 170.

Los diferentes tipos de agregados tienen compresibilidad, módulo de elasticidad, propiedades de contracción relacionada con humedad diferentes que pueden afectar las mismas propiedades del concreto. Los agregados con absorción elevada pueden tener alta contracción por secado. Los agregados de cuarzo y feldespato,

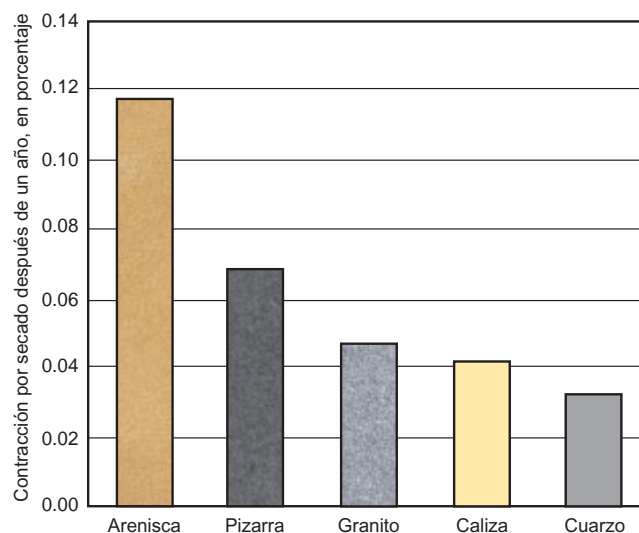


Fig. 5-17. Concretos conteniendo arenisca o pizarra presentan alta contracción. Granito, calizas y cuarzo son agregados que producen concretos con baja contracción (ACI 221R).

además de calizas, dolomitas y granitos, se consideran como agregados de baja contracción, mientras que los agregados con arenisca, pizarra, hornblenda y grauvaca frecuentemente están asociados con una alta contracción del concreto (Fig. 5-17).

Resistencia a Ácidos y Otras Sustancias Corrosivas

El concreto de cemento portland es durable en la mayoría de los ambientes naturales, pero, sin embargo, el concreto se puede exponer ocasionalmente a sustancias que lo atacarán.

La mayoría de las soluciones ácidas se desintegran lenta o rápidamente en concreto de cemento portland, dependiendo del tipo y la concentración del ácido. Ciertos ácidos, tales como el ácido oxálico, son inofensivos. Las soluciones débiles de algunos ácidos tienen efectos insignificantes. A pesar de que normalmente los ácidos atacan y lixivian los compuestos de calcio de la pasta de cemento, pueden no atacar fácilmente ciertos agregados, como los agregados silíceos. Los agregados calcáreos frecuentemente reaccionan rápidamente con los ácidos. Sin embargo, el efecto de sacrificio del agregado calcáreo es normalmente benéfico comparándose con el agregado silíceo en un ambiente de exposición a ácidos suaves o en áreas donde no haya agua fluyendo. Con los agregados calcáreos, el ácido ataca uniformemente toda la superficie expuesta del concreto, reduciendo la tasa de ataque de la pasta y previniendo la pérdida de las partículas de agregados en la superficie. Los agregados calcáreos también tienden a neutralizar al ácido, especialmente en sitios estancados. Los ácidos también pueden decolorar el concreto. Se deben evitar los agregados silíceos cuando

soluciones fuertes de hidróxido de sodio estén presentes, pues estas soluciones atacan este tipo de agregado.

La lluvia ácida (frecuentemente con pH de 4 a 4.5) puede marcar levemente la superficie del concreto, normalmente sin afectar el desempeño de las estructuras de concreto expuestas. La lluvia extremadamente ácida o condiciones con agua muy ácida pueden justificar diseños o precauciones especiales para el concreto, especialmente en áreas sumergidas. El abastecimiento continuo de ácido con pH de menos de 4, como ocurre en tuberías, se considera altamente agresivo y suficiente para quemar el concreto (Scanlon 1987). El concreto continuamente expuesto a líquidos con pH menor que 3 se debe proteger de manera similar al concreto expuesto a soluciones ácidas diluidas (ACI 515.1R).

Las aguas naturales normalmente tienen un pH mayor que 7 y raramente menor que 6. Las aguas con pH mayor que 6.5 pueden ser agresivas si contienen bicarbonatos. Las soluciones de ácido carbónico con concentraciones entre 0.9 y 3 partes por millón se consideran destructivas para el concreto (ACI 515.1R y Kerkhoff 2001).

Una relación agua-cemento baja, baja permeabilidad y un contenido de cemento de bajo a moderado pueden aumentar la resistencia a ácidos o la resistencia a corrosión del concreto. Una baja permeabilidad que resulte de una baja relación agua-cemento o el uso de humo de sílice u otras puzolanas, ayudan a evitar la penetración del agente corrosivo en el concreto. El contenido de cemento de bajo a moderado resulta en menos pasta susceptible al ataque. El uso de agregados calcáreos de sacrificio se debe considerar donde sea necesario.

Ciertos ácidos, gases, sales y otras sustancias que no se mencionaron aquí también pueden desintegrar el concreto. Se debe evitar el contacto del concreto con ácidos y otros productos químicos que atacan severamente el concreto a través de recubrimientos de protección (Kerkhoff 2001).

Resistencia al Fuego y Propiedades Térmicas

La resistencia al fuego y las propiedades térmicas del concreto – conductividad, difusibilidad y coeficiente térmico de expansión – dependen hasta un cierto punto de los constituyentes minerales de los agregados empleados. Los agregados ligeros manufacturados y algunos de los naturales son más resistentes al fuego que los agregados de peso normal debido a sus propiedades aislantes y su estabilidad en temperaturas elevadas. Los concretos que contienen agregado grueso calcáreo tienen un comportamiento mejor, bajo la exposición al fuego, que los concretos que contienen cuarzo o agregados silíceos, tales como los granitos y cuarcita. A aproximadamente 590°C (1060°F), el cuarzo expande 0.85%, causando una expansión perjudicial (ACI 216 y ACI 221). El coeficiente térmico de expansión de los agregados varía de 0.55×10^{-6} por °C a 5×10^{-6} por °C (1×10^{-6} por °F a 9×10^{-6} por °F). Para más información sobre

cambios de volumen inducidos por la temperatura, consulte el Capítulo 15 y para conductividad térmica y consideraciones sobre el concreto masivo, véase Capítulo 18.

MATERIALES POTENCIALMENTE PERJUDICIALES

Las sustancias perjudiciales que pueden estar presentes en los agregados incluyen impurezas orgánicas, limo, arcilla, esquisto, óxido de hierro, carbón mineral, lignito y ciertas partículas ligeras y suaves (Tabla 5-7). Además, rocas y minerales, como el chert y el cuarzo deformado (Buck y Mather 1984) y ciertas calizas dolomíticas son reactivas con álcalis (Tabla 5-8). El yeso y la anhidrita pueden causar ataque de sulfatos. Ciertos agregados, como los esquistos causan erupciones por el abundamiento (sencillamente por la absorción de agua) o por el congelamiento del agua absorbida (Fig. 5-18). La mayoría de las especificaciones limitan las cantidades permisibles de estas sustancias. La historia del comportamiento de un agregado debe ser un factor determinante para la elección de los límites para las sustancias perjudiciales. Los métodos de ensayo para la detección cualitativa y cuantitativamente de las sustancias perjudiciales se presentan en la Tabla 5-7.

Los agregados son potencialmente peligrosos si contienen compuestos considerados químicamente reactivos con el concreto de cemento portland y si producen: (1) cambio significativo del volumen de la pasta, agregados o ambos, (2) interferencia en la hidratación normal del cemento y (3) otros productos secundarios dañinos.

Las impurezas orgánicas pueden retrasar el fraguado y el endurecimiento del concreto, reducir el desarrollo de la resistencia y, en algunos casos poco usuales, causar el deterioro. Las impurezas orgánicas, como las turbas, los humus y las margas orgánicas pueden no ser tan perjudiciales, pero se las debe evitar.

Los materiales más finos que 75 μm (tamiz No. 200), especialmente el limo y la arcilla, pueden estar presentes como polvo suelto y pueden formar un revestimiento en las partículas de agregados. Incluso hasta los revestimientos finos de limo o arcilla, sobre las partículas de agregado grueso, pueden ser dañinos, pues debilitan la adherencia entre la pasta de cemento y el agregado. Si ciertos tipos de limo o arcilla están presentes en cantidades excesivas, la demanda de agua puede aumentar significativamente.

Hay una tendencia de algunos agregados finos en degradarse por la acción de molienda en la mezcladora de concreto. Este efecto, que se mide por la ASTM C 1137, puede alterar la demanda de agua de mezcla, de aire incluido y los requisitos de revenimiento (asentamiento).

El carbón mineral o el lignito u otros materiales de baja densidad como la madera y los materiales fibrosos, cuando están presentes en grandes cantidades, afectan la durabilidad del concreto. Si estas impurezas ocurren en la superficie o cerca de ella, se pueden desintegrar, causar erupciones o manchas. Los cherts potencialmente dañinos en el agre-

Tabla 5-7. Materiales Perjudiciales en Agregados

Sustancia	Efecto en el concreto
Impurezas orgánicas	Afecta el tiempo de fraguado y el endurecimiento, puede causar deterioro.
ASTM C 40 (AASHTO T 21), COVENIN 0256, NCh166, NMX-C-088-1997-ONNCCE, NTC 127, NTP 400.024, UNIT-NM 49 ASTM C87 (AASHTO T 71), COVENIN 0275, IRAM 1647, NMX-C-07, NTC 579, NTP 400.013,	
Material más fino que 75 µm (tamiz No. 200)	Afecta adherencia, aumenta la demanda de agua
ASTM C 117 (AASHTO T 11), IRAM 1540, NMX-C-084, NCh1223, NTC 78, NTE 0697, NTP 400.018, UNIT-NM 46	
Carbón, lignito u otro material ligero	Afecta la durabilidad, puede causar manchas y erupciones.
ASTM C 123 (AASHTO T 113), COVENIN 0260, NMX-C-072-1997-ONNCCE, NTC 130, NTE 0699, NTP 400.023, UNIT-NM 31	
Partículas blandas	Afecta la durabilidad
ASTM C 235, IRAM 1644, UNIT-NM 32	
Terrones de arcilla y partículas desmenuzables	Afecta la trabajabilidad y la durabilidad, puede causar erupciones
ASTM C 142 (AASHTO T 112), COVENIN 0257, IRAM 1647, NMX-C-071, NCh1327, NTC 589, NTE 0698, NTP 400.015, UNIT-NM 44	
Chert con masa específica relativa menor que 2.40	Afecta la durabilidad, puede causar erupciones
ASTM C 123 (AASHTO T 113), COVENIN 0260, NMX-C-072-1997-ONNCCE, NTC 130, NTE 0699, NTP 400.023, UNIT-NM 31 ASTM C 295, IRAM 1649, NMX-C-265, NTC 3773, UNIT-NM 54	
Agregados reactivos con los álcalis	Causa expansión anormal, ("viboritas", acocodrilamiento, piel de cocodrilo) Fisuración en forma de mapa
ASTM C 227, COVENIN 0276, IRAM 1637, NMX-C-180, NTC 3828, NTP 334.113, NTP 334.067 ASTM C 289, NTC 175, NTP 334.099 ASTM C 295, IRAM 1649, NMX-C-265, NTC 3773, UNIT-NM 54 ASTM C 342, NMX-C-282 ASTM C 586, COVENIN 1303, ASTM C 1260 (AASHTO T 303), IRAM 1674, NMX-C-298, NTP 334.110, UNIT 1038 ASTM C 1293, IRAM 1700	

Tabla 5-8. Algunos Minerales Reactivos Potencialmente Perjudiciales y Materiales Sintéticos

Sustancias reactivas álcali-sílice*		Sustancias reactivas álcali-carbonato**
Andesitas	Esquistos	Calizas dolomíticas
Argilitas	Filitas	Dolomitas calcíticas
Calcedonia	Gneis granítico	Dolomitas finamente granuladas
Cherts	Grauvacas	
Cherts calcedónicos	Material volcánico vitrificado o criptocristalino	
Ciertas calizas silíceas y dolomitas	Metagrauvacas	
Cristobalita	Ópalo	
Cuarcitas	Pizarras opalinas	
Cuarzo deformado y otras formas de cuarzo	Pizarras silíceas	
Cuarzosas	Riolitas	
Dacita	Vidrio silíceo natural y sintético	
	Tridmita	

* Varias rocas listadas (por ejemplo, granito, gneis y ciertas formaciones de cuarzo) reaccionan muy lentamente y tal vez no muestran evidencias de cualquier grado nocivo de reactividad hasta que el concreto tenga más de 20 años de edad.

** Sólo algunas fuentes de estos materiales han mostrado reactividad.

gado grueso se pueden identificar a través de las normas ASTM C 123 (AASHTO T 113), COVENIN 0260, NMX-C-072-1997-ONNCCE, NTC 130, NTE 0699, NTP 400.023, UNIT-NM 31.



Fig. 5-18. La erupción es el desprendimiento de un pequeño fragmento de la superficie de concreto debido a la presión interna, que deja una depresión típicamente cónica y poco profunda. (IMG12316)

Las partículas blandas en el agregado grueso son especialmente indeseables pues pueden causar erupciones y pueden afectar la durabilidad y la resistencia al desgaste del concreto. Si son desmenuzables, se pueden romper y aumentar, aun más, la demanda de agua. Donde la resistencia a la abrasión sea importante, como en los pisos industriales, los ensayos pueden indicar que se justifica una investigación u otra fuente de agregados.

Los terrones de arcilla en el concreto pueden absorber parte del agua de mezcla, causar erupciones en el concreto endurecido y afectar la durabilidad y la resistencia al desgaste. También se pueden fracturar durante el mezclado y, como consecuencia, aumentar la demanda de agua.

Los agregados pueden eventualmente contener partículas de óxido de hierro y sulfuro de hierro que resultan en manchas antiestéticas sobre las superficies expuestas del concreto (Fig. 5-19). El agregado debe cumplir con los requisitos de manchado de la ASTM C 330 (AASHTO M 195), cuando son ensayados conforme la ASTM C 641 o cumplir con COVENIN 1895, IRAM 1688, NMX-C-348, NMX-C-299, NTC 4045, UNIT-NM 35 y el frente de la cantera y las pilas del material no deben presentar manchas.

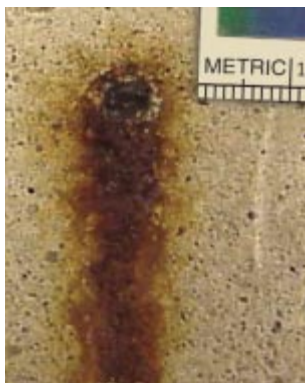


Fig. 5-19. Mancha de óxido de hierro provocada por impurezas en el agregado. (IMG12422)

Se puede sumergir el agregado en una lechada de cal para ayudar en la identificación de manchas. Si las partículas que provocan manchas están presentes, se forma un precipitado gelatinoso verde azulado en un periodo de 5 a 10 minutos, que rápidamente se vuelve marrón al ser expuesto al aire y a la luz. La reacción se debe completar en 30 minutos. Si no se forma el precipitado gelatinoso marrón cuando se coloca el agregado en la lechada, existe poca probabilidad de que ocurra cualquier reacción en el concreto. Estos ensayos son necesarios cuando se usan agregados sin ningún registro de empleo anterior en concreto arquitectónico.

REACTIVIDAD ÁLCALI-AGREGADO

Los agregados que contienen ciertos constituyentes pueden reaccionar con los hidróxidos alcalinos en el concreto. La reactividad es potencialmente perjudicial sólo cuando produce una expansión significativa (Mather 1975). Esta reactividad álcali-agregado (RAA) se presenta en dos formas—reacción álcali-sílice (RAS) y reacción álcali-carbonato (RAC). La RAS es más preocupante que la RAC porque la ocurrencia de agregados que contienen minerales reactivos de sílice es más común. Los agregados de carbonatos reactivos con álcalis tienen una composición específica que no es muy común.

La reactividad álcali-sílice se ha reconocido como una fuente potencial de deterioro desde finales de los años 30 (Stanton 1940 y PCA 1940). A pesar de que existan agregados reactivos en toda América Latina y EE.UU., la ocurrencia de RAS no es tan común. Existen muchas razones para esto:

- La mayoría de los agregados son estables en concreto de cemento hidráulico.
- Agregados con buenos registros de servicio son abundantes en muchas áreas.
- La mayoría de los concretos en servicio están suficientemente secos para inhibir RAS.
- En muchas mezclas de concreto, el contenido de álcalis del concreto es suficientemente bajo para controlar la RAS.
- Algunas formas de RAS no producen expansión nociva significativa.

Para reducir el potencial de la RAS se hace necesario entender su mecanismo, usar adecuadamente los ensayos para identificar los agregados potencialmente reactivos y, si es necesario, tomar precauciones para minimizar el potencial de expansión y el agrietamiento resultante.

Reacción Álcali-Sílice

Síntomas Visuales de la Expansión por RAS. Los indicadores de RAS pueden ser: red de grietas (fisuras) (Fig. 5-20), juntas cerradas o lascadas, desplazamiento relativo de diferentes partes de la estructura o la aparición de



Fig. 5-20. (Superior e inferior). Fisuración del concreto debido a la reacción álcali-agregado. (IMG12421, IMG13049)

erupciones en la superficie (Fig. 5-21). Como el deterioro por RAS es lento, el riesgo de la falla catastrófica es bajo. La RAS puede causar problemas de funcionalidad o utilización y puede exacerbar otros mecanismos de deterioro, como aquéllos que ocurren en la exposición a congelación, a descongelantes y a sulfatos.

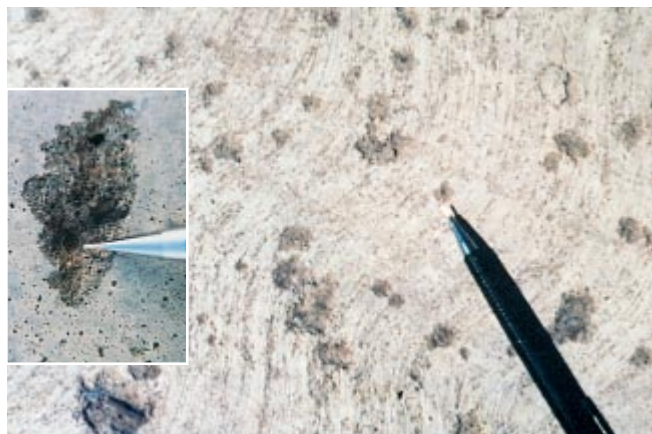


Fig. 5-21. Erupciones causadas por RAS de partículas del tamaño de la arena. La foto interna enseña un primer plano de la erupción. (IMG12318, IMG12983)

Mecanismo de la RAS. La reacción álcali-sílice forma un gel que se expande cuando absorbe agua de la pasta de cemento de su alrededor. Los productos de la reacción de RAS tienen una gran afinidad con la humedad. Este gel, al absorber agua, puede inducir presión, expansión y fisuración del agregado y de la pasta. La reacción se puede visualizar en dos etapas:

1. Hidróxido alcalino + gel de sílice reactiva → producto de la reacción (gel álcali-sílice)
2. Gel del producto de la reacción + humedad → expansión

La cantidad de gel que se forma en el concreto depende de la cantidad y del tipo de sílice y concentración del hidróxido alcalino. La presencia de gel no siempre coincide con el daño y, por lo tanto, la presencia de gel no indica necesariamente la ocurrencia de RAS.

Factores que Afectan la RAS. Para que la RAS ocurra, tres condiciones deben estar presentes:

1. Una forma reactiva de sílice en el agregado,
2. Una solución en el poro altamente alcalina (pH) y
3. Humedad suficiente.

Si una de estas condiciones está ausente, la reacción RAS no puede ocurrir.

Métodos de Ensayo para Identificar el Daño por RAS.

Es importante que se distinga entre la reacción y el daño resultante de la reacción. En el diagnóstico del deterioro del concreto, es más probable que se identifique el gel, pero, en algunos casos, se forma una cantidad significativa de gel sin haber daño al concreto. Para que se determine que la RAS es la causa del daño, se debe verificar la presencia del gel nocivo. Se puede definir el lugar de la reacción expansiva

como una partícula de agregado reconocidamente reactivo que se haya reemplazado parcialmente por el gel. El gel puede estar presente en las fisuras y vacíos y también puede estar presente como un anillo alrededor de los bordes de las partículas de agregado. Una red interna de grietas, conectando las partículas de agregado reactivo, es una indicación casi segura de que la RAS es responsable por el agrietamiento. El examen petrográfico (ASTM C 856) es el método más seguro para la identificación del gel de RAS en concreto (Powers 1999). La petrografía, cuando se la usa para estudiar una reacción conocida (AATH, 2001), puede confirmar la presencia de los productos de reacción y verificar la RAS como la causa principal del deterioro (Fig. 5-22).

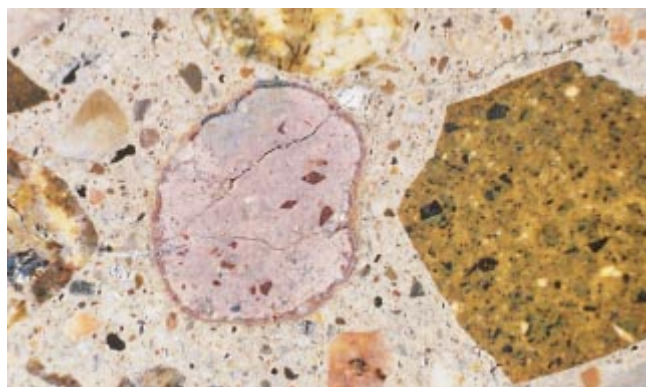


Fig. 5-22. Vista de una sección pulida de un agregado reactivo con álcalis en el concreto. Obsérvese la reacción álcali-sílice que contorna el agregado reactivo y la formación de fisuras. (IMG13650)

Control de la RAS en el Concreto Nuevo. La mejor manera de evitar la RAS es tomar precauciones apropiadas antes de la colocación del concreto. Las especificaciones de norma pueden requerir modificaciones para tratar de RAS. Estas modificaciones se deben establecer cuidadosamente para evitar que se limiten las opciones de los productores de concreto. Esto permite un análisis cuidadoso de los materiales cementantes y agregados y la elección de la estrategia de control que mejore la eficiencia y la economía de los materiales elegidos. Si la identificación histórica o los ensayos muestran que el agregado no es reactivo, no se necesitan de requisitos especiales.

Identificación de los Agregados Potencialmente Reactivos.

El comportamiento histórico en campo es el mejor medio de evaluarse la susceptibilidad de un agregado a la RAS. Para una evaluación más definitiva, el concreto existente debe estar en servicio, por lo menos, por 15 años. Se deben hacer las comparaciones entre el concreto existente y las proporciones de mezcla del concreto propuesto, sus componentes y el ambiente de servicio. Este proceso debe decir si se hacen necesarios requisitos especiales o si son necesarios ensayos de los agregados o del concreto. Los métodos de ensayo más nuevos y rápidos se pueden utilizar para la investigación inicial. Cuando aparezcan incertidumbres, se deben usar ensayos más demorados para confirmar los resultados. La Tabla 5-9 describe dife-

Tabla 5-9. Métodos de Ensayo para la Reactividad Álcali-Sílice (Farny y Kosmatka 1997)

Ensayo	Propósito	Tipo de ensayo	Tipo de muestra	Duración del ensayo	Medida	Criterio	Comentarios
Reactividad potencial a álcalis de combinaciones de cemento-agregado (método de la barra de mortero)	Ensayar la susceptibilidad de las combinaciones cemento-agregado a las reacciones expansivas involucrando álcalis	Barras de mortero almacenadas sobre agua a 37.8°C (100°F) y alta humedad relativa	Por lo menos 4 barras de mortero con dimensión estándar 25 x 25 x 285 mm (1 x 1 x 11¼ pulg.)	Varias: primera medida a los 14 días, entonces a 1, 2, 3, 4, 6, 9 y 12 meses. Después de esto a cada 6 meses, si necesario.	Cambio de longitud	Expansión máxima de 0.10% en 6 meses y de 0.05% en 3 meses.	El ensayo puede no producir expansión significativa, especialmente para el agregado de carbonato. Ensayo de larga duración. Expansiones pueden no ser de una reacción álcali-agregado.
ASTM C 227, COVENIN 0276, IRAM 1637, NMX-C-180, NTC 3828, NTP 334.113, NTP 334.067							
Reactividad potencial álcali-sílice de los agregados (método químico)	Determinar el potencial de reactividad de agregados silíceos	Muestra atacada con solución alcalina a 80°C (176°F)	Tres muestras de 25 gramas de agregado triturado y tamizado	24 horas	Disminución de la alcalinidad y de la cantidad de sílice en la solución	Puntos del gráfico que se encuentren en el área deletérea o potencialmente deletérea	Resultados rápidos. Algunos agregados presentan baja expansión aún cuando tienen alto contenido de sílice. No es confiable.
ASTM C 289, NTC 175, NTP 334.099, IRAM 1650							
Constituyentes de los agregados minerales naturales	Presentar una nomenclatura descriptiva de los más comunes e importantes minerales naturales – ayudar a determinar su comportamiento	Identificación visual	Varios, pero deben ser representativos de toda la fuente	Corta duración – lo que sea necesario para examinar visualmente la muestra	Descripción del tipo y de la proporción de los minerales en el agregado	No se aplica	Estas descripciones se usan para caracterizar minerales naturales que están presentes en las fuentes más comunes de agregado.
ASTM C 294, IRAM 1517, NMX-C-305, UNIT-NM 66							
Examen petrográfico de agregados para concreto	Presentar un perfil de los procedimientos de examen petrográfico de agregados – ayudar a determinar su comportamiento	Examen visual y microscópico de muestras preparadas – análisis granulométrico, microscopía y rajado	Varios con conocimiento de la cantera: testigos de 53 a 100 mm de diámetro (2½ a 4 pulg.) 45 kg (100 lb) o 300 piezas, o 2 kg (4 lb)	Corta duración – el examen visual no involucra periodos largos de ensayo	Características de las partículas, tales como forma, tamaño, textura, color, composición mineralógica y condición física.	No se aplica	Normalmente incluye microscopía óptica. También puede incluir análisis DRX, análisis térmico diferencial o espectroscopía – véase C 294 (IRAM 1517, NMX-C-305, UNIT-NM 66) para la nomenclatura descriptiva.
ASTM C 295, IRAM 1649, NMX-C-265, NTC 3773, UNIT-NM 54							

Tabla 5-9. Métodos de Ensayo para la Reactividad Álcali-Sílice (Continuación)

Ensayo	Propósito	Tipo de ensayo	Tipo de muestra	Duración del ensayo	Medida	Criterio	Comentarios
Cambio de volumen potencial de combinaciones de cemento-agregado	Determinar el potencial de la expansión por RAS de combinaciones de cemento-agregado	Barras de mortero almacenadas a 23°C (73.4°F) y alta humedad relativa	Tres barras de mortero por combinación cemento-agregado con dimensiones estándar: 25 x 25 x 285 mm (1 x 1 x 11¼ pulg.)	52 semanas	Cambio de volumen	El agregado es insatisfactorio si su expansión es igual o mayor que 0.200% en 1 año	Se usa principalmente para agregados de Oklahoma, Kansas, Nebraska e Iowa.
ASTM C 342, NMX-C-282							
Eficiencia de puzolanas o escoria granulada de alto horno en la prevención de la expansión excesiva del concreto resultante de la reacción álcali-sílice	Determinar la eficiencia de los materiales cementantes suplementarios en el control de la expansión debida a RAS	Barras de mortero –usando vidrio pirex como agregado – almacenadas en agua a 37.8°C (100°F) y alta humedad relativa	Por lo menos tres barras de mortero y también tres barras de mortero de la mezcla de control	Varias: primera medida a los 14 días, entonces a 1, 2, 3, 4, 6, 9 y 12 meses. Después de esto a cada 6 meses, si es necesario.	Cambio de volumen	Por la ASTM C 989, reducción mínima de 75% de la expansión o 0.200% de expansión máxima o por la C 618, comparable con el control de bajo álcalis	El agregado artificial altamente reactivo puede no representar las condiciones reales del agregado. Pírex contiene álcalis.
ASTM C 441, IRAM 1648, NMX-C-298, NTC 3828, NTP 334.110							
Examen petrográfico del concreto endurecido	Presentar un perfil de los procedimientos de examen petrográfico del concreto endurecido-útil en la determinación de las condiciones y del desempeño	Examen Visual (sin aumento) y microscópico de muestras preparadas	Por lo menos un testigo con 150 mm de diámetro por 300 mm de longitud (6 pulg x 12 pulg.)	Corta duración – incluye preparación de las muestras y examen visual y microscópico	¿Se sabe que el agregado es reactivo? Orientación y geometría de las fisuras. ¿Hay algún gel presente?	Véase medidas – este examen determina si la RAS ocurre y sus efectos sobre el concreto. Usado en conjunto con otros ensayos	Las probetas se pueden examinar con estereomicroscopio, microscopio polarizador, microscopio metalográfico y microscopio electrónico de barrido.
ASTM C 856							

Tabla 5-9. Métodos de Ensayo para la Reactividad Álcali-Sílice (Continuación)

Ensayo	Propósito	Tipo de ensayo	Tipo de muestra	Duración del ensayo	Medida	Criterio	Comentarios
Procedimiento de tratamiento con uranilo-acetato	Identificar los productos de RAS en el concreto endurecido	Manchado de la superficie de concreto recién expuesta y vista bajo luz UV	Varios: testigo con superficie esmerilada o con la superficie rota	Resultados inmediatos	Intensidad de la fluorescencia	Falta de fluorescencia	Identifica pequeñas cantidades de gel de RAS aún que no causen expansión. Ópalo, un agregado natural, y la pasta carbonatada pueden brillar – interprete los resultados adecuadamente. Los ensayos se deben complementar con examen petrográfico y ensayos físicos para determinar la expansión del concreto.
ASTM C 856 (AASHTO T 299)							
Método de manchado Los Alamos (Powers 1999)	Identificar los productos de RAS en el concreto endurecido	Manchado de la superficie de concreto recién expuesta a dos tipos de reactivos	Varios: testigo con superficie esmerilada o con la superficie rota	Resultados inmediatos	Color de la mancha	Manchas rosa oscuro corresponde al gel de RAS e indica una etapa avanzada de degradación	
Reactividad potencial a álcalis de agregados (método de la barra de mortero)	Ensayar el potencial de la reacción álcali-sílice deletérea de agregados en barras de mortero	Inmersión de barras de mortero en una solución alcalina a 80°C (176°F)	Por lo menos tres barras de mortero	16 días	Cambio de volumen	Si es mayor que 0.10%, consulte los procedimientos de ensayo complementarios; si es mayor que 0.20%, indica un potencial de reacción deletérea expansiva	Una alternativa bien rápida para el ASTM C 277.Útil para agregados con reactividad lenta o aquéllos que producen expansión retardada en la reacción.
ASTM C 1260 (AASHTO T 303), IRAM 1674, NMX-C-298, NTP 334.110, UNIT 1038							
Determinación del cambio de longitud debido a la reacción álcali-sílice (ensayo del prisma de concreto)	Determinar el potencial de la expansión por RAS de combinaciones cemento-agregado	Prismas de concreto almacenados en agua a 38°C (100.4°F)	Tres prismas por combinación cemento-agregado con dimensiones estándar: 75 x 75 x 285 mm (3 x 3 x 11¼ pulg.)	Varias: primera medida a los 7 días, entonces a los 28 días y 56 días, 3, 6, 9 y 12 meses. Después de esto a cada 6 meses, si es necesario.	Cambio de volumen	Por el apéndice X1 de la ASTM C 1293, el agregado es potencialmente reactivo si la expansión es igual o superior a 0.04% en un año	Requiere una larga duración de ensayo para obtenerse resultados significativos. Se usa como complemento para la ASTM C 277, C 295, C 289 y C 1260. Similar a CSA A23.2-14A.
ASTM C 1293, IRAM 1700							
Ensayo acelerado del prisma de concreto	Determinar el potencial de la expansión por RAS de combinaciones cemento-agregado	Prismas de concreto almacenados sobre agua a 60°C (140°F)	Tres prismas por combinación cemento-agregado con dimensiones estándar: 75 x 75 x 285 mm (3 x 3 x 11¼ pulg.)	3 meses (91 días)	Cambio de volumen	La reacción es potencialmente deletérea si la expansión se iguala o supera a 0.04% a 91 días	Una alternativa rápida para ASTM C 277. Buena correlación con ASTM C 227 para rocas carbonáticas y sedimentarias.
ASTM C 1293 modificado							

rentes métodos de ensayos usados para evaluar la reactividad álcali-agregado potencial. Estos ensayos no se deben usar para descalificar el uso de un agregado potencialmente reactivo, pues los agregados reactivos se pueden usar sin problemas con la elección cuidadosa de los materiales cementantes, como se discute en seguida.

Materiales y Métodos para Control de la RAS. El medio más eficiente de control de la expansión causada por la RAS es el diseño de mezclas especiales, preferentemente con el uso de materiales disponibles localmente. Las siguientes opciones no se listan en orden de prioridad y, aunque normalmente no sean necesarias, se las pueden utilizar en combinación de una con la otra.

En América del Norte, las prácticas actuales incluyen el uso de materiales cementantes suplementarios o cementos mezclados (adicionados) que, comprobado a través de ensayos, controlan o limitan el contenido de álcalis en el concreto. Los materiales cementantes suplementarios incluyen ceniza volante, escoria granulada de alto horno, humo de sílice y puzolanas naturales. Los cementos mezclados usan escoria, ceniza volante, humo de sílice y puzolanas naturales para controlar la RAS. El cemento con bajo contenido de álcalis (ASTM C 150, NCR 40, NMX-C-414 y NTP 334.009), inferior a 0.60% (óxido de sodio equivalente) se puede usar para controlar la RAS. Su empleo ha sido bien sucedido con agregados ligeros o medianamente reactivos. Sin embargo, los cementos con bajo contenido de álcalis no están disponibles en todas las regiones. Por lo tanto, se prefiere la utilización de los cementos disponibles localmente en combinación con puzolanas, escorias o cementos adicionados para controlar la RAS. Cuando las puzolanas, escorias o cementos adicionados se usan para controlar la RAS, su eficiencia se debe determinar a través de ensayos tales como ASTM C 1260 (modificado), IRAM

1674, NMX-C-298, NTP 334.110, UNIT 1038 o ASTM C 1293, IRAM 1700. Cuando es aplicable, se deben ensayar cantidades diferentes de puzolanas o escorias para que se determine la dosis ideal. La expansión normalmente disminuye con el aumento de la dosis de puzolana o escoria (Fig. 5-23). Los aditivos a base de litio también están disponibles para el control de RAS. El ablandamiento con caliza (término popular para el reemplazo de aproximadamente 30% del agregado reactivo por caliza triturada) es eficiente en el control del deterioro en algunos concretos con agregado de arena-grava. Consulte AASHTO (2001), Farny y Kosmatka (1997) y PCA (1998) para más información sobre los ensayos para la determinación de la eficiencia de las medidas descritas anteriormente.

Reacción Álcali-Carbonato

Mecanismo de la RAC. Las reacciones que se observan en ciertas rocas dolomíticas están asociadas con la reacción álcali-carbonato (RAC). Las rocas reactivas contienen cristales grandes de dolomita dispersos y rodeados por una matriz de granos finos de calcita y arcilla. La calcita es una de las formas minerales del carbonato de calcio y la dolomita es el nombre común para el carbonato de calcio-magnesio. La RAC es relativamente rara porque los agregados susceptibles a esta reacción normalmente no son apropiados para el uso en concreto por otras razones, tales como la resistencia potencial. Las calizas dolomíticas arcillosas contienen calcita y dolomita con cantidades apreciables de arcilla y pueden contener pequeñas cantidades de sílice reactiva. La reactividad a álcalis de las rocas carbonáticas normalmente no depende de la composición mineralógica de la arcilla (Hadley 1961). Los agregados tienen un potencial para la RAC expansiva si están presentes las siguientes características litológicas (Ozol 1994 y Swenson 1967):

- Contenido de arcilla, o residuo insoluble, en el rango del 5% al 25%;
- Relación entre calcita y dolomita de aproximadamente 1:1;
- Aumento en el volumen de la dolomita hasta el punto que la textura entrelazada se vuelva un factor de restricción y
- Cristales dolomíticos discontinuos de pequeño tamaño dispersos en la matriz de arcilla.

Dedolomitización. La dedolomitización, o la ruptura de la dolomita, se asocia normalmente con la RAC expansiva (Hadley 1961). El concreto que contiene dolomita y se expandió también contiene brucita (hidróxido de magnesio, $Mg(OH)_2$), que se forma por la dedolomitización. La dedolomitización prosigue de acuerdo con la siguiente ecuación (Ozol 1994):

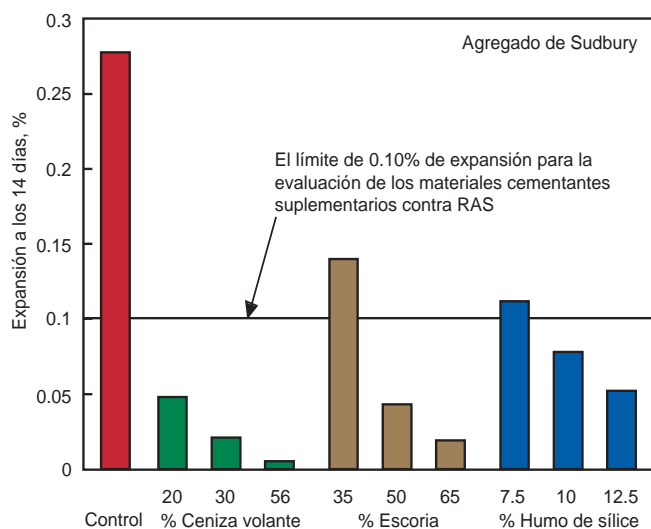
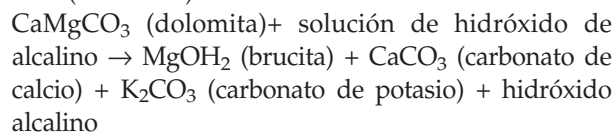


Fig. 5-23. Influencia en la expansión de la barra de mortero (ASTM C 1260) de diferentes cantidades de ceniza volante, escoria y humo de sílice con relación a la masa de material cementante después de 14 días, al usarse agregado reactivo (Fournier 1997).

La reacción de dedolomitización y la cristalización subsiguiente de la brucita pueden causar una expansión considerable. La expansión causada directa o indirectamente por la dedolomitización frecuentemente es un prerrequisito para otros procesos expansivos (Tang, Deng y Lon 1994).

Métodos de Ensayo para la Identificación de los Daños por RAC. Los tres métodos normalmente usados para la identificación de la reactividad potencial álcali-carbonato de los agregados son:

- Examen petrográfico (ASTM C 295);
- Método del cilindro de roca (ASTM C 586) y
- Ensayo del prisma de concreto (ASTM C 1105).

Materiales y Métodos de Control de RAC. El agregado susceptible a RAC tiene una composición específica que se identifica fácilmente por los ensayos petrográficos. Si la roca indica susceptibilidad a RAC, se pueden tomar las siguientes precauciones:

- Cantera seleccionada para evitar completamente la reacción del agregado;
- Agregado mezclado de acuerdo con el apéndice de la ASTM C 1105 o
- Limitar el tamaño del agregado al menor posible.

El cemento de bajo contenido de álcalis y las puzolanas no son generalmente muy efectivos en el control de la RAC expansiva.

BENEFICIO DE AGREGADOS

El procesamiento del agregado consiste en: (1) procesamiento básico – trituración, tamizado y lavado – para obtener la granulometría y la limpieza adecuadas y (2) beneficio – mejoramiento de la calidad a través de métodos de procesamiento, tales como separación en un medio pesado, tamizado con agua, clasificación por corriente ascendente y trituración.

En la separación en medio pesado, los agregados pasan a través de un líquido pesado compuesto de minerales pesados finamente granulados y agua, proporcionado para tener una masa específica relativa (densidad relativa) menor que las partículas de agregado deseadas pero mayor que las partículas dañinas. Las partículas más pesadas se hunden en el fondo mientras que las partículas más livianas flotan en la superficie. Este proceso se puede usar cuando las partículas aceptables y las dañinas tienen masas específicas relativas muy diferentes.

El tamizado separa las partículas con pequeñas diferencias de masa específica pulsando una corriente de agua. Las pulsaciones de agua hacia arriba a través de un tamiz (una caja con el fondo perforado) mueven el material más ligero para formar una capa sobre el material más pesado. Entonces, se remueve la capa de arriba.

La clasificación por corriente ascendente separa las partículas con grandes diferencias de masa específica. Los materiales ligeros, como la madera y el lignito, flotan en una rápida corriente ascendente de agua.

La trituración también se usa para remover las partículas blandas y desmenuzables de los agregados gruesos. Este proceso es, algunas veces, el único medio para lograr la utilización de este material. Infelizmente, en cualquier proceso, parte del material aceptable algunas veces se pierde y la remoción de las partículas dañinas puede ser difícil y costosa.

MANEJO Y ALMACENAMIENTO DE AGREGADOS

Los agregados se deben manejar y almacenar de manera que se minimicen la segregación y la degradación y que se prevenga la contaminación con sustancias deletéreas (Fig. 5-24). Las pilas se deben construir en capas delgadas de espesor uniforme para minimizar la segregación. El método más económico y aceptable de formación de pilas de agregados es el método de volteo con camión, que descarga el material de manera que no se lo separe. Entonces, se recupera el agregado con un cargador frontal. El cargador debe remover porciones de los bordes de la pila desde la parte inferior hacia la parte superior, de manera que cada porción contenga una parte de cada capa horizontal.

Cuando no se entregan los agregados en camiones, se pueden obtener resultados aceptables y económicos con la formación de pilas en capas con un cucharón de quijadas (método de tirar y extender). En el caso de agregados no sujetos a degradación, se pueden tender los agregados con un tractor de neumático (llantas) de caucho y recuperar con un cargador frontal. Al tender el material en capas finas, la segregación se minimiza. Sea el manejo con camión, con cargador, con cucharón de quijadas o estera (banda) transportadora, no se deben construir pilas altas en forma de cono, pues resultan en segregación. Sin embargo, si las circunstancias demandan la construcción de pilas cónicas, o si las pilas se han segregado, las variaciones de la granulometría se pueden disminuir cuando se recupera la pila.



Fig. 5-24. Pila de agregados en una planta de concreto premezclado. (IMG12420)

En estos casos, los agregados se deben cargar con un movimiento continuo alrededor de la pila para que se mezclen los tamaños, en vez de comenzar en un lado y trabajar en línea recta a través de la pila.

Los agregados triturados segregan menos que los agregados redondeados (grava) y los agregados mayores segregan más que los agregados menores. Para evitar la segregación del agregado grueso, las fracciones de tamaño se pueden amontonar y dosificar separadamente. Sin embargo, los procedimientos de amontonamiento adecuados, deben eliminar esta necesidad. Las especificaciones ofrecen un rango de las cantidades permitidas de material en cada fracción debido a la segregación en las operaciones de amontonamiento y dosificación.

Los agregados que han sido lavados se deben amontonar con anticipación suficiente para que se drenen, hasta una humedad uniforme, antes de su uso. El material fino húmedo tiene una tendencia menor para segregar que el material seco. Cuando el agregado fino seco se descarga en los cubos o esteras (bandas) transportadoras, el viento puede llevarse los finos. Esto se debe evitar al máximo.

Las mamparas o las divisiones se deben usar para evitar la contaminación de las pilas de agregados. Las divisiones entre las pilas deben ser suficientemente altas para prevenir el mezclado de los materiales. Los depósitos de almacenamiento deben ser circulares o casi cuadrados. Su fondo debe tener una inclinación mayor que 50 grados con la horizontal en todos los lados hasta un escurridero central. Al cargarse el depósito, el material debe caer verticalmente sobre el escurridero dentro del depósito. El vaciado del material dentro del depósito en un ángulo y contra los lados del depósito causará segregación. Las placas de desviación o divisores ayudarán a minimizar la segregación. El depósito se debe mantener lleno si es posible, pues reduce la rotura de las partículas de agregados y la tendencia de segregación. Los métodos recomendados de manejo y almacenamiento de agregados se discuten profundamente en Matthews (1965 a 1967), NCHRP (1967) y Bureau of Reclamation (1981).

AGREGADO DRAGADO DEL MAR

Los materiales dragados del mar, de los estuarios de las mareas y la arena y grava del litoral se pueden usar con prudencia en algunas aplicaciones de concreto cuando otras fuentes de agregados no estén disponibles. Los agregados obtenidos del mar tienen dos problemas: (1) las conchas marinas y (2) la sal.

Las conchas marinas pueden estar presentes en la fuente de agregado. Estas conchas son un material duro que puede producir un concreto de buena calidad, pero, sin embargo, la demanda de cemento puede aumentar. También, debido a su angularidad, se requiere pasta adicional de cemento para que se obtenga la trabajabilidad deseable. Los agregados conteniendo conchas completas (no trituradas) se deben evitar pues su presencia puede

resultar en vacíos en el concreto y disminución de la resistencia a compresión.

Los agregados dragados del mar frecuentemente contienen sal. Las sales principales son el cloruro de sodio y el sulfato de magnesio y la cantidad de sal en los agregados es frecuentemente mayor que 1% de la masa del agua de mezcla. El mayor contenido de sal ocurre en las arenas que se encuentran justo encima del nivel de la marea alta. El uso de estos agregados junto con el agua de mezcla potable normalmente contribuye con menos sal a la mezcla que el uso de agua del mar (como agua de mezcla) con agregados libres de sal.

Los agregados marinos pueden ser una fuente apreciable de cloruros. La presencia de estos cloruros puede afectar el concreto: (1) alterando el tiempo de fraguado, (2) aumentando la contracción (retracción) por secado, (3) aumentando significativamente el riesgo de corrosión del acero de refuerzo (armadura) y (4) causando eflorescencia. Generalmente, los agregados marinos que contengan grandes cantidades de cloruros no se deben usar en el concreto reforzado (armado).

Los agregados dragados del mar se pueden lavar con agua fresca para reducir el contenido de sal. No hay un límite máximo de contenido de sal de los agregados fino y grueso, pero, los límites de cloruros presentados en el Capítulo 9 se deben seguir.

AGREGADOS DE CONCRETO RECICLADO

En los últimos años, el concepto del uso de concreto viejo de pavimentos, edificios y otras estructuras como fuente de agregados se ha indicado en muchos proyectos, resultando en ahorro de material y energía (ECCO 1999). El procedimiento involucra: (1) demoler y remover el concreto viejo, (2) trituración en los trituradores primarios y secundarios (Fig. 5-25), (3) remoción del acero de refuerzo y otros artículos embebidos, (4) tamizado y lavado y (5) finalmente



Fig. 5-25. El concreto con cantidades elevadas de refuerzo se trituran con un triturador de vigas. (IMG12419)



Fig. 5-26. Pila de agregado de concreto reciclado. (IMG12219)

amontonamiento de los agregados fino y grueso resultantes (Fig. 5-26). Se debe evitar que el producto final se contamine con polvo, yeso, madera y otros materiales extraños.

El concreto reciclado es simplemente el concreto viejo que se trituró para producir agregado. El agregado de concreto reciclado se usa principalmente en la reconstrucción de pavimentos. Se lo ha usado satisfactoriamente como un agregado en subbases granulares, subbases de concreto magro, suelo-cemento y en el concreto nuevo como la única fuente o como reemplazo parcial del agregado nuevo.

El agregado de concreto reciclado generalmente tiene una mayor absorción y una masa específica relativa menor que el agregado convencional. Esto resulta de la alta absorción del mortero poroso y de la pasta de cemento endurecido en el agregado de concreto reciclado. Los valores de absorción típicamente varían del 3% al 10%, dependiendo del concreto que se recicla. Esta absorción se encuentra entre los valores de agregados naturales y ligeros. Los valores aumentan a medida que el tamaño del agregado grueso disminuye (Fig. 5-27). La alta absorción del agregado reciclado aumenta la demanda de agua para que se obtenga la misma trabajabilidad y revenimiento (asentamiento) si es comparado con un concreto con agregado convencional. El agregado reciclado seco absorbe agua durante y después del mezclado. Para evitar esto, el agregado reciclado se debe pre-humedecer o las pilas se deben mantener húmedas.

La forma de las partículas de los agregados de concreto reciclado es similar a las rocas trituradas, como se enseña en la Figura 5-28. La masa específica relativa disminuye progresivamente a medida que el tamaño de las partículas disminuye. El contenido de sulfatos de los agregados de concreto reciclado se debe determinar para que se evalúe la posibilidad de la reactividad deletérea de los sulfatos. El contenido de sulfatos se debe determinar donde sea necesario.

El concreto nuevo producido con agregado de concreto reciclado generalmente tiene una buena trabajabilidad. La carbonatación, permeabilidad y resistencia a congelación-

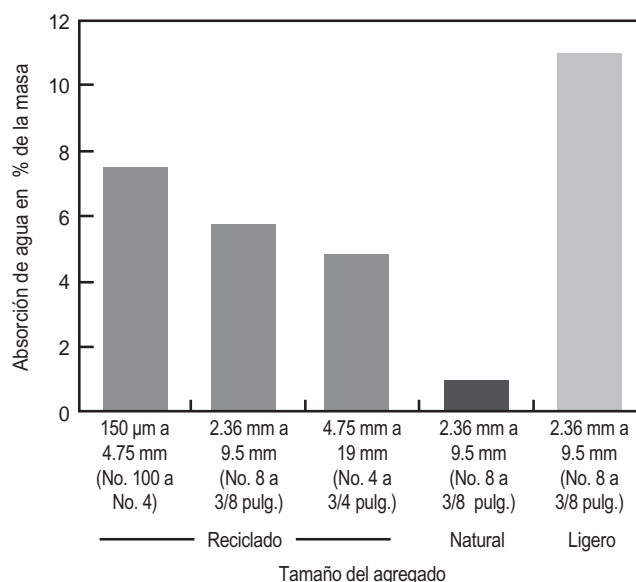


Fig. 5-27. Comparación de la absorción de agua de tres tamaños diferentes de partículas de agregado reciclado y un tamaño de agregado grueso ligero natural. (Kerkhoff y Siebel 2001).

deshielo se han mostrado similares o hasta mejores que el concreto con agregado convencional. El concreto producido con agregado grueso reciclado y agregado fino convencional puede lograr una resistencia a compresión adecuada. El uso de agregado fino reciclado puede resultar en una pequeña disminución de la resistencia a compresión. Sin embargo, la contracción por secado y la fluencia del concreto con el agregado reciclado es hasta 100% mayor que el concreto con agregado convencional. Esto se debe a la gran cantidad de pasta de cemento y mortero viejos, especialmente en el agregado fino. Por lo tanto, valores considerablemente menores de contracción por secado se pueden lograr con el uso de agregado grueso reciclado y arena natural (Kerkhoff y Siebel 2001). De la misma manera que cualquier fuente nueva de agregado, el agregado de



Fig. 5-28. Agregado de concreto reciclado. (IMG12220)

concreto reciclado se debe ensayar con relación a durabilidad, granulometría y otras propiedades.

El concreto reciclado que se usa como agregado grueso en el concreto nuevo posee algún potencial de reacción álcali-sílice si el concreto viejo contiene agregado reactivo. El contenido de álcali del cemento empleado en el concreto viejo tiene poco efecto en la expansión debido a la reacción álcali-sílice. Para agregados altamente reactivos producidos del concreto reciclado, se deben usar las medidas especiales para prevención de la RAS, discutidas en "Reacción Álcali-Sílice". Aunque la RAS expansiva no se haya desarrollado en el concreto original, no se puede asumir que no se vaya a desarrollar en el concreto nuevo, caso no se tomen medidas preventivas. El examen petrográfico y los ensayos de expansión se recomiendan para esta evaluación (Stark 1996).

Se deben producir mezclas de pruebas para la comprobación de la calidad del concreto y para determinar las proporciones adecuadas de la mezcla. Uno de los problemas potenciales del uso de concreto reciclado es la variabilidad en las propiedades del concreto viejo, que, a su vez, puede afectar las propiedades del concreto nuevo. Se lo puede evitar parcialmente con el control frecuente de las propiedades del concreto viejo que se esté reciclando. Se pueden hacer necesarios ajustes de las proporciones de la mezcla.

REFERENCIAS

- AASHTO, *Guide Specification For Highway Construction SECTION 56X Portland Cement Concrete Resistant to Excessive Expansion Caused by Alkali-Silica Reaction – Appendix F to ASR Transition Plan (Especificación para la Construcción de Carreteras Sección 56X Concrete de Cemento Portland Resistente a la Expansión Excesiva Causada por la Reacción Álcali-Sílice – Apéndice F para el Plan de Transición de RAS)*, <http://leadstates.tamu.edu/ASR/library/gspec.stm>, 2001.
- Abrams, D. A., *Design of Concrete Mixtures (Diseño de las Mezclas de Concreto)*, Lewis Institute, Structural Materials Research Laboratory, Bulletin No. 1, PCA as LS001, Chicago, http://www.portcement.org/pdf_files/LS001.pdf, 1918, 20 pages.
- ACI Committee 116, *Cement and Concrete Technology (Tecnología del Cemento y del Concreto)*, ACI 116R-00, ACI Committee 116 Report, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2000, 73 páginas.
- ACI Committee 201, *Guide to Durable Concrete (Guía del Concreto Durable)*, ACI 201.2R-92, reprobado en 1997, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1992.
- ACI Committee 216, *Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements (Guía para la Determinación de la Resistencia al Fuego de los Elementos de Concreto)*, ACI 216R-89, reprobada en 1994, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1989.
- ACI Committee 221, *Guide for Use of Normal Weight Aggregates in Concrete (Guía para el Uso de Agregado de Peso Normal en Concreto)*, ACI 221R-96, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1996.
- ACI Committee 221, *Guide to Alkali Aggregate Reactions (Guía de las Reacciones Álcali-Agregado)*, ACI 221.1-98, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1998.
- ACI Committee 515, *A Guide to the Use of Waterproofing, Dampproofing, Protective, and Decorative Barrier Systems for Concrete (Guía para el Uso de Sistemas de Barrera Impermeabilizante, a Prueba de Agua, Protectorio y Decorativo para el Concreto)*, ACI 515.1R-79, revisado en 1985, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1979.
- Barksdale, Richard D., *The Aggregate Handbook (Manual del Agregado)*, National Stone Association, Washington D.C., 1991.
- Bérubé, M. A.; Fournier, B.; y Durant, B., *Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (Reacción Álcali-Agregado en el Concreto)*, 11th International Conference, Québec City, Canada, Junio 2000.
- Bhatti, Muhammad S. Y., "Mechanism of Pozzolanic Reactions and Control of Alkali-Aggregate Expansion (Mecanismo de las Reacciones Puzolánicas y Control de la Expansión Álcali-Agregado)," *Cement, Concrete, and Aggregates*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, Invierno 1985.
- Brown, L. S., *Some Observations on the Mechanics of Alkali-Aggregate Reaction (Algunas Observaciones sobre los Mecanismos de la Reacción Álcali-Agregado)*, Research Department Bulletin RX054, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX054.pdf, 1955.
- Buck, Alan D., "Recycled Concrete as a Source of Aggregate (Concreto Reciclado como una Fuente de Agregado)," *ACI Journal*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, Mayo 1977, páginas 212 a 219.
- Buck, Alan D., y Mather, Katharine, *Reactivity of Quartz at Normal Temperatures (Reactividad del Cuarzo a Temperaturas Normales)*, Technical Report SL-84-12, Structures Laboratory, Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, Julio 1984.

Buck, Alan D.; Mather, Katharine; y Mather, Bryant, *Cement Composition and Concrete Durability in Sea Water (Composición del Cemento y Durabilidad del Concreto en Agua del Mar)*, Technical Report SL-84-21, Structures Laboratory, Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, Diciembre 1984.

Bureau of Reclamation, *Concrete Manual (Manual del Concreto)*, 8th ed., U.S. Bureau of Reclamation, Denver, 1981.

Crouch, L. K.; Sauter, Heather J.; y Williams, Jakob A., “92-MPa Air-entrained HPC (Concreto de Alto Desempeño de 92 MPa con Aire Incluido),” TRB-Record 1698, *Concrete* 2000, página 24.

ECCO (Environmental Council of Concrete Organizations), “Recycling Concrete and Masonry (Concreto y Mampostería Reciclados),” EV 22, Skokie, Illinois, <http://www.ecco.org/pdfs/ev22.pdf>, 1999, 12 páginas.

EPA, *Acid Rain (Lluvia Ácida), Research Summary*, EPA-600/8-79-028, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., Octubre 1979.

EPA, *Final Report, U.S. EPA Workshop on Acid Deposition Effects on Portland Cement Concrete and Related Materials (Taller sobre los Efectos de la Deposición de Ácidos sobre el Concreto de Cemento Portland y Materiales Relacionados)*, Atmospheric Sciences Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina, Febrero 1986.

Farny, James A. y Kosmatka, Steven H., *Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate Reactions (Diagnóstico y Control de las Relaciones Alkali-Agregado)*, IS413, Portland Cement Association, 1997, 24 páginas.

Fournier, B., *CANMET/Industry Joint Research Program on Alkali-Aggregate Reaction—Fourth Progress Report (Programa de Investigación Conjunta de CANMET y la Industria sobre la Reacción Alkali-Agregado – Cuarto Informe del Progreso)*, Canada Centre for Mineral and Energy Technology, Ottawa, 1997.

Galloway, Joseph E., Jr., “Grading, Shape and Surface Properties (Granulometría, Forma y Propiedades de la Superficie),” *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, ASTM STP 169C, edited by Klieger, Paul and Lamond, Joseph F., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, 1994, páginas 401 a 410.

Hadley, D. W., “Alkali Reactivity of Carbonate Rocks—Expansion and Dedolomitization (Reactividad a Alkalís de las Rocas Carbonáticas—Expansión y Dedolomitización),” Research Department Bulletin RX139, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX139.pdf, 1961.

Harrigan, Edward T., “Performance of Pavement Subsurface Drainage” (Desempeño del Drenaje de la Superficie del Pavimento), *NCHRP Research Results Digest*, No. 268, Transportation Research Board, Washington, D.C., Noviembre 2002.

Helmuth, Richard, *Alkali-Silica Reactivity: An Overview of Research (Reactividad Alkali-Sílice: Una Perspectiva General de la Investigación)*, SHRP-C-342, Strategic Highway Research Program, Washington, D. C., 1993. También Publicación de la PCA LT177, 105 páginas.

Houston, B. J., *Investigation of Gap-Grading of Concrete Aggregates; Review of Available Information (Investigación de los Agregados con Granulometría Discontinua, Revisión de la Información Disponible)*, Technical Report No. 6-593, Report 1, Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, Febrero 1962.

Janssen, Donald J., y Snyder Mark B., “Resistance of Concrete to Freezing and Thawing (Resistencia del Concreto a Hielo y Deshielo),” SHRP-C-391, Strategic Highway Research Program, Washington, D.C., 1994, 201 páginas.

Kerkhoff, Beatrix, *Effects of Substances on Concrete and Guide to Protective Treatments (Efectos de las Sustancias sobre el Concreto y Guía de los Tratamientos de Protección)*, IS001, Portland Cement Association, 2001, 24 páginas.

Kerkhoff, Beatrix and Siebel, Eberhard, “Properties of Concrete with Recycled Aggregates (Part 2) (Propiedades del Concreto con Agregados Reciclados – Parte 2),” *Beton* 2/2001, Verlag Bau + Technik, 2001, páginas 105 a 108.

Kong, Hendrik, y Orbison, James G., “Concrete Deterioration Due to Acid Precipitation (Deterioro del Concreto debido a la Precipitación de Ácido),” *ACI Materials Journal*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, Marzo-Abril 1987.

Litvin, Albert, y Pfeifer, Donald W., *Gap-Graded Mixes for Cast-in-Place Exposed Aggregate Concrete (Mezclas de Granulometría Discontinua para el Concreto con Agregado expuesto Colado en Obra)*, Development Department Bulletin DX090, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/DX090.pdf, 1965.

Maerz, Norbert H., y Lusher, Mike, “Measurement of flat and elongation of coarse aggregate using digital image processing (Medida de la Planicidad y del Elongación del Agregado Grueso usando Procesamiento Digital de Imagen),” *80th Annual Meeting, Transportation Research Board*, Washington D.C., 2001, páginas 2 a 14.

Mather, Bryant, *New Concern over Alkali-Aggregate Reaction (Nueva Preocupación sobre la Reacción Alkali-Agregado)*, Joint Technical Paper by National Aggregates Association and National Ready Mixed Concrete Association, NAA Circular No. 122 and NRMCA Publication No. 149, Silver Spring, Maryland, 1975.

Matthews, C. W., "Stockpiling of Materials (Almacenamiento de Materiales)," *Rock Products*, series of 21 articles, Maclean Hunter Publishing Company, Chicago, de Agosto 1965 hasta Agosto 1967.

National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), *Effects of Different Methods of Stockpiling and Handling Aggregates (Efecto de Diferentes Métodos de Almacenamiento y Manoseo de Agregados)*, NCHRP Report 46, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1967.

Ozol, Michael A., "Alkali-Carbonate Rock Reaction (Reacción de los Álcalis con las Rocas Carbonáticas)," *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, ASTM STP 169C, edited by Klieger, Paul and Lamond, Joseph F., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994, páginas 372 a 387.

PCA, *Tests of Concrete Road Materials from California (Ensayos de los Materiales para las Carreteras de Concreto de California)*, Major Series 285, Research Reports, Portland Cement Association, Abril 1940.

PCA, *Recycling D-Cracked Pavement in Minnesota (Reciclaje de Pavimentos con Agrietamiento en D en Minesota)*, PL146, Portland Cement Association, 1980.

PCA, "Popouts: Causes, Prevention, Repair (Erupciones: Causas, Prevención y Reparación)," *Concrete Technology Today*, PL852, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/PL852.pdf, Junio 1985.

PCA Durability Subcommittee, *Guide Specification for Concrete Subject to Alkali-Silica Reactions (Guía para la Especificación del Concreto Sujeto a Reacciones Alkali-Sílice)*, IS415, Portland Cement Association, 1998.

PCA, "Controlling ASR (Control de la RAS)," *Concrete Technology Today*, PL971, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/PL971.pdf, Abril 1997.

Powers, Laura J., "Developments in Alkali-Silica Gel Detection (Desarrollos en la Detección del Gel de Alkali-Sílice)," *Concrete Technology Today*, PL991, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/PL991.pdf, Abril 1999.

Scanlon, John M., *Concrete Durability (Durabilidad del Concreto)*, *Proceedings of the Katherine and Bryant Mather International Conference*, SP100, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1987.

Shilstone, James M., "Changes in Concrete Aggregate Standards (Cambios en las Normas de Agregados para Concreto)," *The Construction Specifier*, Alexandria, Virginia, Julio 1994, páginas 119 a 128.

Shilstone, James M., Sr., "Concrete Mixture Optimization (Optimización de las Mezclas de Concreto)," *Concrete International*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, Junio 1990, páginas 33 a 39.

Stanton, Thomas E., "Expansion of Concrete through Reaction between Cement and Aggregate (Expansión del Concreto por la Reacción entre el Cemento y el Agregado)," *Proceedings, American Society of Civil Engineers*, Vol. 66, New York, 1940, páginas 1781 a 1811.

Stark, David, *Characteristics and Utilization of Coarse Aggregates Associated with D-Cracking (Características y Utilización de Agregados Gruesos Asociados al Agrietamiento en D)*, Research and Development Bulletin RD047, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RD047.pdf, 1976.

Stark, D. C., *Alkali-Silica Reactivity: Some Reconsiderations (Reactividad Alkali-Sílice: Algunas recomendaciones)*, Research and Development Bulletin RD076, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RD076.pdf, 1981.

Stark, David, "The Use of Recycled-Concrete Aggregate from Concrete Exhibiting Alkali-Silica Reactivity (El Uso de Agregados de Concreto Reciclado de Concreto Expuestos a la Reactividad Alkali-Sílice)," Research and Development Bulletin RD114, Portland Cement Association, 1996.

Stark, David, y Klieger, Paul, *Effect of Maximum Size of Coarse Aggregate on D-Cracking in Concrete Pavements (Efecto del Tamaño Máximo del Agregado Grueso sobre el Agrietamiento en D en Pavimentos de Concreto)*, Research and Development Bulletin RD023, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RD023.pdf, 1974.

Stark, David, *Eliminating or Minimizing Alkali-Silica Reactivity (Eliminación o Disminución de la Reactividad Alkali-Sílice)*, SHRP-C-343, Strategic Highway Research Program, Washington, D. C., 1993. También Publicación de la PCA LT178, 266 páginas.

Swenson, E. G., y Gillott, J. E., "Alkali Reactivity of Dolomitic Limestone Aggregate (Reactividad con los Álcalis del Agregado de Caliza Dolomítica)," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 19, No. 59, Cement and Concrete Association, London, Junio 1967, páginas 95 a 104.

Tang, Mingshu; Deng, Min; Lon, Xianghui; y Han, Sufeng, "Studies on Alkali-Carbonate Reaction (Estudios sobre la Reacción Alkali-Carbonato)," *ACI Materials Journal*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, Enero-Febrero 1994, páginas 26 a 29.

Thomas, M. D. A.; Hooton, R. Doug; y Rogers, C. A., "Prevention of Damage Due to Alkali-Aggregate Reaction (AAR) in Concrete Construction—Canadian Approach (Prevención de los Daños debidos a la Reacción Álcali-Agregado en la Construcción de Concreto – Enfoque Canadiense)," *Cement, Concrete, and Aggregates*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, 1997, páginas 26 a 30.

Thomas, M. D. A., e Innis, F. A., "Effect of Slag on Expansion Due to Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (Efecto de la Escoria sobre la Expansión debida a la Reacción Álcali-Agregado en el Concreto)," *ACI Materials Journal*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, Noviembre-Diciembre 1998.

Touma, W. E.; Fowler, D. W.; y Carrasquillo, R. L., *Alkali-Silica Reaction in Portland Cement Concrete: Testing Methods and Mitigation Alternatives (Reacción Álcali-Sílice en el Concreto de Cemento Portland: Métodos de Ensayo y Alternativas para la Mitigación)*, Research Report ICAR 301-1F, University of Texas, Austin, 2001, 520 páginas.

Verbeck, George, y Landgren, Robert, *Influence of Physical Characteristics of Aggregates on Frost Resistance of Concrete (Influencia de las Características de los Agregados sobre la Resistencia a la Congelación del Concreto)*, Research Department Bulletin RX126, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX126.pdf, 1960.

Vogler, R. H., y Grove, G. H., "Freeze-thaw testing of coarse aggregate in concrete: Procedures used by Michigan Department of Transportation and other agencies (Ensayo de Hielo-deshielo de los Agregados Gruesos en el Concreto: Procedimientos usados por el departamento de transporte de Michigan y otras agencias)," *Cement, Concrete, and Aggregates*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, Vol. 11, No. 1, Verano 1989, páginas 57 a 66.

